



## **Departamento de Ingeniería Aeroespacial**

PROYECTO FIN DE CARRERA

### **OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE LA MATRIZ DE CALIBRACIÓN DE UNA CÉLULA DE CARGA**

Autor:

Rubén de la Iglesia Bardera

Tutor:

Oscar Flores Arias

Co-Director:

Javier RodríguezRodríguez

Director:

Oscar Flores Arias

Leganés, Febrero 2013

## **Agradecimientos**

A Oscar Flores y Javier Rodríguez por sus enseñanzas.

A Carlos Cobos y Ernesto García por su ayuda en la parte experimental.

A mi familia y amigos por su apoyo.

## Resumen

El presente proyecto está dirigido a la obtención de parámetros característicos de una matriz de calibración de una célula de carga.

Para poder llevar a cabo esta tarea, se diseñó una estructura que actuó como soporte de la célula sobre la cual se realizaron distintos ensayos para obtener distintos valores. Se calcularon todas las dimensiones, así como se tuvo especial cuidado en el espesor de la estructura para que soporte las fuerzas que se van a aplicar. Esta estructura fue de tres piezas las cuales se explican en el correspondiente capítulo. También se usó un amplificador para poder ampliar la señal de salida y poder medir los valores. Este amplificador fue desarrollado por un técnico de la universidad.

Con los valores que se obtuvieron se resolvió un sistema de ecuaciones usando el ajuste por mínimos cuadrados a través de MATLAB y se consiguió los parámetros de la matriz de calibración de la célula. Finalmente se compararon los datos obtenidos con la matriz dada por el fabricante, y se analizaron los posibles errores llegando a la conclusión de haber obtenido una buena matriz de calibración con un error de entorno al 5 %.

## Contenido

Agradecimientos .....	2
Resumen.....	3
Capítulo 1 .....	7
1. Introducción y objetivos.....	7
1.1. Introducción .....	7
1.2. Objetivos .....	9
1.3. Medios empleados .....	10
1.4. Estructura de la memoria.....	11
Capítulo 2 .....	12
2. Célula de carga .....	12
2.1. Introducción .....	12
2.2. Principio de medida.....	13
2.2.1. Estructura que se va a deformar .....	13
2.2.2. Galga extensiométrica.....	14
2.2.3. Unión de las galgas extensiométricas .....	15
2.3. Tipos de células de cargas según el principio de medición.....	16
2.3.1. Basada en la forma externa: .....	16
2.3.2. Basada en la forma de material que se deforma: .....	16
2.3.3. Basada en la dirección de la carga: .....	18
2.3.4. Basada en hermeticidad.....	19
2.4. Especificaciones de una célula de carga .....	20
2.5. Configuración de una célula de carga .....	22
2.6. Selección de una célula de carga.....	24
2.7. Matriz de calibración de una célula de carga.....	25
Capítulo 3 .....	26
3. Diseño de la estructura .....	26
3.1. Estudio de la base.....	27
3.1.1. Dimensiones de la placa.....	27
3.1.2. Estudio de la fuerza que soportan los tornillos.....	28
3.1.3. Selección de tornillos .....	32
3.1.4. Análisis de aplastamiento .....	33
3.2. Estudio de la varilla .....	35

3.3. Estudio de la placa que soportará las fuerzas .....	38
Capítulo 4 .....	39
4. Amplificadores .....	39
Capítulo 5 .....	40
5. Realización de los ensayos .....	40
5.1. Medidas realizadas.....	40
Capítulo 6 .....	42
6. Cálculo de la matriz de calibración.....	42
6.1. Explicación del método empleado .....	42
6.2. Resultados .....	44
6.2.1 Análisis de los resultados .....	44
6.3. Análisis de errores .....	46
Capítulo 7 .....	48
7. Conclusiones y futuras líneas de trabajo .....	48
7.1. Conclusiones.....	48
7.2. Futuras líneas de trabajo.....	49
Capítulo 8 .....	50
8. Referencias.....	50
8.1. Libros .....	50
8.2. Documentos electrónicos y páginas web.....	50
Capítulo 9 .....	51
9. Anexos.....	51
9.1. Esquemas del amplificador .....	51
9.2. Imágenes del montaje y Medidas .....	59
9.2.1. Fotografías del montaje: .....	59
9.2.2. Imagen de LabView: .....	61
9.2.3. Medidas:.....	63
9.3 Código para obtener la matriz de calibración .....	65
9.4 Matriz de calibración dada por el fabricante .....	73
9.5 Cómo usar .....	74

## Ilustraciones

Ilustración 1 Diagrama de un puente de Wheatstone .....	7
Ilustración 2 Gráfica típica de tensión deformación .....	13
Ilustración 3 Tipos de células de carga basadas en su forma externa .....	16
Ilustración 4 Célula de carga tipo columna .....	16
Ilustración 5 Célula de carga tipo viga.....	17
Ilustración 6 Célula de carga tipo cizallamiento.....	17
Ilustración 7 Célula de carga tipo anillo .....	18
Ilustración 8 Célula de carga tipo diafragma.....	18
Ilustración 9 Célula de carga sometida a tensión .....	18
Ilustración 10 Célula de carga sometida a compresión .....	18
Ilustración 11 Célula de carga sometida a tensión y compresión.....	19
Ilustración 12 Célula de carga sometida a flexión.....	19
Ilustración 13 Diagrama de un puente de Wheatstone .....	22
Ilustración 14 Esquema estructura .....	26
Ilustración 15 Plano base de la estructura .....	28
Ilustración 16 Vista superior de la célula de carga en la base.....	29
Ilustración 17 Diagrama de fuerzas desarrollado en la célula sujeta a la placa.....	30
Ilustración 18 Planos de las dos posibles posibilidades .....	31
Ilustración 19 Estudio de la flecha en el extremo del cilindro .....	35
Ilustración 20 Planos cilindro superior.....	37

## Tablas

Tabla 1 Obtención de márgenes de seguridad.....	32
Tabla 2 Matriz de calibración experimental.....	44
Tabla 3 Matriz de calibración experimental.....	44
Tabla 4 Matriz de calibración dada por el fabricante .....	44
Tabla 5 Matriz experimental dividida entre el factor de proporcionalidad.....	45
Tabla 6 Matriz experimental dividida entre el factor de proporcionalidad.....	46
Tabla 7 Matriz de calibración dada por el fabricante .....	46
Tabla 8 Matriz error .....	46

## Capítulo 1

### 1. Introducción y objetivos

#### 1.1. Introducción

Una célula de carga es un transductor (dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente a la salida) que es utilizado para convertir una fuerza en una señal eléctrica.

Esta conversión es indirecta y se realiza en dos etapas:

Primero, mediante un dispositivo mecánico, la fuerza que se desea medir deforma una galga extensiométrica.

Después, la galga extensiométrica convierte el (desplazamiento) o deformación en señales eléctricas.

Las células de carga tienen diversos usos en el ámbito de la industria. Uno de ellos es el de medir la fuerza aplicada en el pedal de un helicóptero, convertir esa fuerza en una señal eléctrica y transmitir esta señal a los ingenieros, que pueden monitorizar la señal y saber que fuerza está aplicando el piloto al pedal consiguiendo saber cuánto combustible se consume y si se está acelerando o no. Otro uso, es el de poder garantizar una distribución equitativa en la carga de un camión, es decir al cargar un camión interesa que se cargue con una distribución de pesos lo más uniforme posible para que no vuelque, si se sabe la fuerza que soportan ciertas zonas del camión se sabrá donde se debe colocar la siguiente carga en el camión para compensar el peso. Se pueden consultar más aplicaciones en [1].

Una célula de carga por lo general se compone de cuatro galgas extensiométricas individuales conectadas en una configuración tipo puente de Wheatstone, como se muestra en la figura

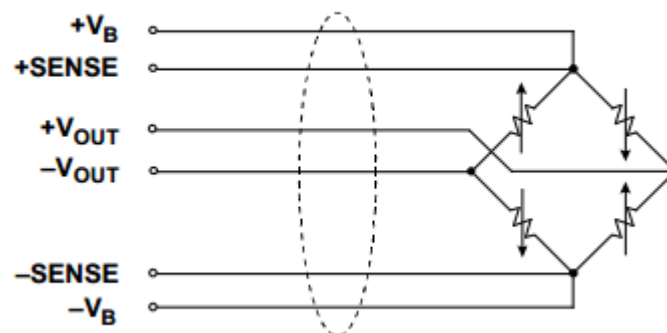


Ilustración 1 Diagrama de un puente de Wheatstone

La impedancia de cada galga suele estar entorno a los 350 ohmios de tal modo que aplicando una tensión de entorno a 10V de corriente continua al puente de Wheatstone, la señal eléctrica de salida es típicamente del orden de unos pocos microvoltios y debe ser amplificada mediante un amplificador de instrumentación para poder ser medida.

Las células de carga pueden ser de una salida, la cual se calibra de manera singular, a si como en el caso de este proyecto es de seis salidas, hará falta conectar la salida del transductor a un algoritmo (una matriz de calibración) para calcular la fuerza aplicada al transductor, puesto que si no las salidas saldrían desacopladas.



## 1.2. Objetivos

El siguiente estudio experimental tiene como objetivo calcular la matriz de calibración para la célula de carga de seis grados de libertad que dispone la Universidad Carlos III de Madrid en el departamento de ingeniería aeroespacial.

Para ello en primer lugar se realizará el diseño de la estructura que soportará a la célula de carga al igual que una varilla atornillada sobre la célula sobre la que se aplicaran fuerzas mediante un sistema de pesas y poleas a distintas distancias para poder obtener distintas combinaciones de fuerzas y momentos sobre la célula. Para poder aplicar estas fuerzas se enroscará a la varilla una placa con dos agujeros simétricos donde se cargara la fuerza mediante el uso de cable acerado.

Puesto que la medida es muy pequeña para ser tomada directamente, se usara un amplificador diseñado en el departamento de electrónica de la universidad que amplificará la señal.

Se tomaran las medidas y con los datos obtenidos se procederá a resolver un sistema de ecuaciones lineal sobredimensionado (más ecuaciones que incógnitas) haciendo uso del método de mínimos cuadrados en MATLAB obteniendo así mayor precisión en la obtención de la matriz de calibración.

### **1.3. Medios empleados**

Para poder llevar a cabo el proyecto, se utilizara la célula de carga de la marca Kyowa, LAT-1010KA-1, de la cual se hallara la matriz de calibración. Para la construcción de la base se usará aluminio 2027 disponible en los laboratorios. Para poder saber con precisión que fuerza se aplicará en la célula, se usaran pesas medidas con básculas de precisión, que mediante el uso de poleas permitirán aplicar fuerzas en distintas direcciones. Por último para amplificar la señal de la célula se usará un amplificador diseñado en las oficinas técnicas de la universidad.

## 1.4. Estructura de la memoria

Para facilitar la lectura de la memoria, se incluye a continuación un breve resumen de cada capítulo:

- En el capítulo 2 se trata sobre los distintos tipos de célula de carga, su construcción, especificaciones etc.
- En el capítulo 3 se detalla todo el proceso de diseño y construcción de la estructura que soportará tanto a la célula de carga, así como la planificación de las fuerzas que se apliquen sobre ella.
- En el capítulo 4 se trata sobre el amplificador usado para poder tomar medidas.
- En el capítulo 5 se explica el método empleado para tomar medidas así como se anexan las medidas tomadas
- En el capítulo 6 se calcula la matriz de calibración de la célula de carga explicando el método empleado.
- En el capítulo 7 se comentan los resultados obtenidos y las futuras líneas de trabajo.
- En el capítulo 8 se adjuntan las referencias.
- En el capítulo 9 se adjuntan diferentes anexos.

## Capítulo 2

### 2. Célula de carga

#### 2.1. Introducción

Una célula de carga se puede definir como un dispositivo de medida de fuerzas en valores eléctricos de voltios. Las células de carga usan diferentes principios de operación y por tanto existen células de carga basadas en:[2]

Presión de un fluido

Elasticidad

Efecto piezoeléctrico

La célula que se usará en este proyecto será la basada en elasticidad mediante el uso de galgas extensiométricas. Por tanto al referirse a célula de carga se sobrentiende que se habla de célula de carga basada en galgas extensiométricas.

La razón de usar este tipo de células en particular es debido a sus características:

- Ofrecen alta precisión en las medidas
- La temperatura tiene una influencia pequeña en sus medidas
- Tienen menor tamaño que otro tipo de células de carga
- Poseen larga vida de operación debido a la ausencia de partes móviles o partes que generen fricción.
- Son fáciles de producir debido a los pocos componentes que poseen
- Tienen excelentes características de fatiga

## 2.2. Principio de medida

Las células de carga extensiométrica consisten en una estructura que se deforma (spring material) y una galga extensiométrica. Esta estructura se deforma debido a la carga aplicada y la galga extensiométrica cambia su resistencia de acuerdo al cambio en la deformación de este elemento.

### 2.2.1. Estructura que se va a deformar

La sensibilidad de esta estructura es el componente principal de la célula. Esta estructura es diseñada de tal manera que aparezca una deformación directamente proporcional a la carga aplicada.

Cuando una fuerza externa es aplicada, se genera una fuerza interna para evitar la deformación provocada por la fuerza externa. Cuando la fuerza externa está compensada con la interna la estructura ya no sigue deformándose y conserva la deformación que consiguió. En ese momento la fuerza interna por unidad de área que se genera a través de la sección del objeto se le llama tensión, y al cambio de dimensiones por unidad de longitud deformación. Los materiales se deforman en proporción a la fuerza aplicada. Por tanto se entiende que a la hora de diseñar una célula de carga las características del material del que está hecho el material que se deforma son muy importantes. El material deberá tener una larga zona de deformación lineal, para nunca llegar a la zona de deformación plástica, donde se perdería la linealidad entre tensión (provocada por la fuerza aplicada) y deformación. Debe ser un material resistente al impacto y con el que sea fácil trabajar. Generalmente se suelen usar aleaciones de acero con níquel, cobre y molibdeno o aluminio.

En la siguiente figura se ve una gráfica típica de tensión-deformación (alargamiento):

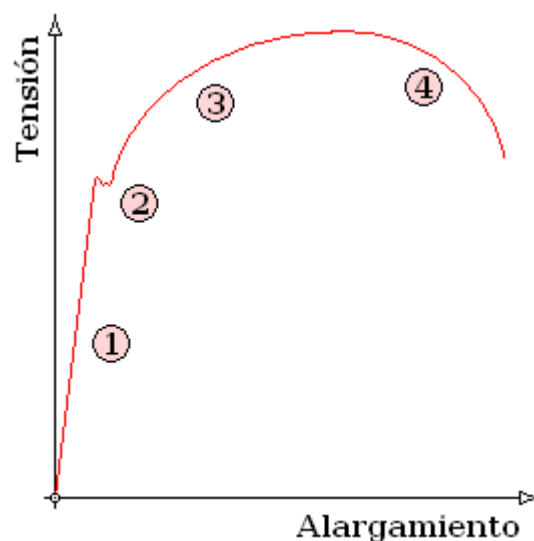


Ilustración 2 Gráfica típica de tensión deformación

Donde 1 refleja la zona lineal llamada deformaciones elásticas y es la zona donde se debe trabajar. La zona 2 refleja un punto de fluencia, una deformación brusca sin aplicar más fuerza. La zona 3 representa la zona de deformaciones plásticas. La probeta recuperara solo parte de su forma inicial al llegar a este punto. La zona 4 representa la zona de estricción y se está ya cerca de la zona de rotura. [3]

### 2.2.2. Galga extensiométrica

Las galgas utilizan cambios en las resistencias de materiales cuando estos se contraen o se alargan para poder medir las tensiones aplicadas. La resistencia dependerá de la resistividad, longitud y sección del material, el mismo tipo de material tendrá distintas resistencias eléctricas dependiendo de si sufre contracción o elongación. Cuanto más se alargue el material más resistencia aparecerá. Este es el principio que usan las galgas extensiométricas para conocer la tensión que se está aplicando en el dispositivo. Para poder medir la deformación, se usa un elemento que consiste en un cable muy fino o más comúnmente una lámina metálica dentro de una malla. La sección transversal al área de la malla se minimiza para reducir el efecto de deformación de tensión y deformación de Poisson. Por tanto la deformación se transfiere directamente a la galga extensiométrica que responde de manera lineal cambiando la resistencia eléctrica y ofreciendo un valor. Generalmente los valores nominales de resistencia de galgas comerciales van de 30 a 3000 ohmios siendo los más comunes de 120,350 y 1000 ohmios.

Una célula de carga está construida mediante la unión de medidores de tensión al elemento que se va a deformar. Para detectar eficientemente la tensión, los medidores de tensión están unidos al material que se deforma. Cuando la deformación causada por la fuerza aplicada a un objeto se encuentra por debajo del límite proporcional, la deformación varía linealmente con la tensión y el valor de la resistencia de la galga varía linealmente con la deformación. En relación al cambio en la deformación que provoca la variación de la resistencia en la galga, se rige por el factor de la galga, que se define como la relación del cambio en la resistencia por unidad de resistencia para el cambio de longitud por unidad de longitud de la galga de tensión. A mayor factor de galga mayor el cambio en la resistencia de la galga. Por lo tanto,

$$\text{Cambio en la Resistencia de la galga} = \text{Resistencia en la galga} \times \text{Factor de galga} \times \text{deformación}$$

El factor de galga en el metal suele ser de aproximadamente 1,5-2

### 2.2.3. Unión de las galgas extensiométricas

Para la unión de bandas extensiométricas, el adhesivo que se emplee necesita transmitir con precisión la deformación del material que se deforma a la galga. Las propiedades deseables del adhesivo para la unión de bandas extensiométricas son:

- La unión adhesiva debería tener una resistencia suficiente para soportar los cambios de temperatura y humedad
- La unión debe tener el suficiente aislamiento contra la temperatura y la humedad.
- El grado de contracción debe ser pequeño cuando vuelve a la normalidad

## 2.3. Tipos de células de cargas según el principio de medición

A continuación se presentan distintas clasificaciones de células en función de su geometría: [2]

### 2.3.1. Basada en la forma externa:

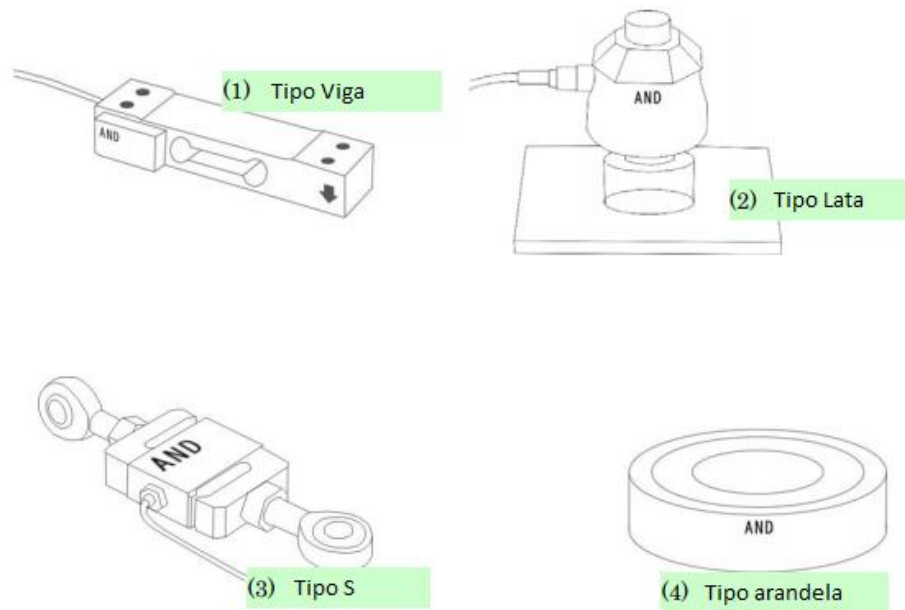


Ilustración 3 Tipos de células de carga basadas en su forma externa

### 2.3.2. Basada en la forma de material que se deforma:

- Tipo columna

Se utiliza una estructura simple y utiliza 2 bandas extensiométricas, uno longitudinal y otra en dirección transversal. Se puede utilizar tanto para las mediciones de tensión como de compresión.

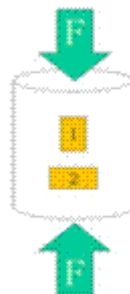


Ilustración 4 Célula de carga tipo columna



- Tipo viga

Estas células de carga utilizan la flexión como el principio de medida. Suponiendo la célula rígida cuando una fuerza ( $F$ ) se aplica a la célula de carga de tipo viga, **el medidor de deformación 1** se contrae mientras **el medidor de tensión 2** se extiende. El valor de la tensión depende de  $L$ ,  $t$  y la anchura de la viga.

Esta estructura es adecuada para células de carga de alta precisión. Ofrecen altos niveles de deformación cuando se aplican fuerzas relativamente bajas, que los hacen ideales para las células de baja capacidad de carga. El rango de medición típico es generalmente de entre 1 kg y 1 T, y no son adecuadas para grandes capacidades

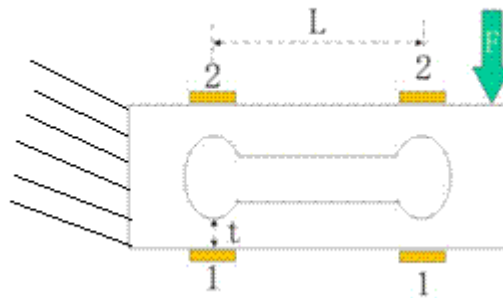


Ilustración 5 Célula de carga tipo viga

- Tipo cizallamiento

Los medidores de deformación se unen en un ángulo de  $45^\circ$  sobre el eje neutro de la célula de carga. Las células de carga de cizallamiento se pueden hacer más pequeña que las células de carga tipo viga manteniendo la misma capacidad. Son fuertemente resistentes a las cargas transversales y es fácil que sean altamente precisas. El rango de medición es generalmente de entre 100 kg y 20 T.

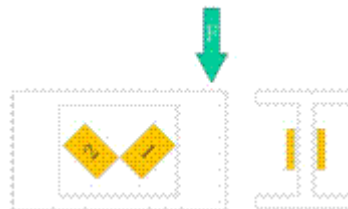


Ilustración 6 Célula de carga tipo cizallamiento

- Tipo anillo

Las células de carga del tipo anillo son células de precisión alta y principalmente tienen una capacidad intermedia, que va desde 500 kg a 20ton.

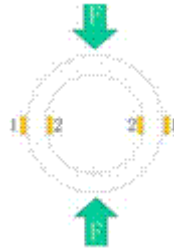


Ilustración 7 Célula de carga tipo anillo

- Tipo diafragma

La célula de carga del tipo de diafragma tiene una forma redonda. La principal ventaja de utilizar una célula de carga del tipo de diafragma es que su altura se puede bajar y es resistente a la carga transversal. [4]



Ilustración 8 Célula de carga tipo diafragma

### 2.3.3. Basada en la dirección de la carga:

- Tensión

La célula de carga solo responde a tensión



Ilustración 9 Célula de carga sometida a tensión

- Compresión

La célula de carga solo responde a compresión



Ilustración 10 Célula de carga sometida a compresión

- Universal

La célula de carga responde a tensión y compresión



Ilustración 11 Célula de carga sometida a tensión y compresión

- Flexión

La célula de carga responde a flexión

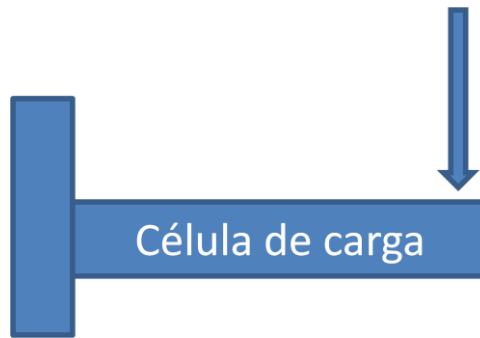


Ilustración 12 Célula de carga sometida a flexión

#### 2.3.4. Basada en hermeticidad

- Herméticamente sellada

Células selladas impidiendo entrar el aire exterior

- Abierta

No están selladas

- A prueba de explosiones

Se sellan de tal manera que no puedan verse afectadas por llamas

## 2.4. Especificaciones de una célula de carga

Cuando se desea escoger una célula de carga se deben tener en cuenta sus especificaciones y en función del uso que se requiera escoger la célula de carga adecuada. Las principales especificaciones son:

- Carga nominal

Es uno de los parámetros clave en la selección de una célula, se define como la máxima carga que una célula de carga puede medir. No se debe sobrepasar este nivel de carga o de lo contrario las medidas no serán fiables.

- Salida nominal

Se define como la diferencia del valor de salida de la célula cuando hay carga y cuando no. Se suele medir en mV/V.

- Nivel seguro de sobrecarga

Se define como la máxima carga que una célula puede soportar sin producir una deformación permanente. Se define como un porcentaje respecto a la carga nominal.

- Rango de temperatura de compensación

Se define como el rango de temperaturas en el que la salida nominal y el balance a cero se compensan para cumplir las especificaciones de la célula de carga.

- Balance cero

Es la señal eléctrica generada cuando una tensión de excitación nominal se aplica sin ninguna carga sobre la célula. En general se expresa como un porcentaje de la salida nominal.

- Efecto de la temperatura en el Balance cero

Es el efecto que tiene la temperatura sobre el balance cero. Este valor se expresa como un porcentaje de la salida nominal.

- Efecto de la temperatura en la señal de salida

Es el efecto que tiene la temperatura sobre la señal de salida. Este valor se expresa como un porcentaje de la salida nominal.

- No linealidad

La no linealidad es la desviación máxima en la salida de la curva de calibración lineal que une el balance cero y la salida nominal.

- Error de histéresis

Es la diferencia máxima de salida generada cuando una carga aumenta y disminuye.

- Error combinado

Es la desviación máxima de salida a partir de la curva de calibración lineal que une el balance cero y la salida nominal, incluso cuando una carga aumenta y disminuye. Se especifica como un porcentaje de la potencia nominal.

- Recomendación de máxima excitación de tensión

Es la tensión aplicada a los terminales de entrada de una célula de carga. Una excitación típica suele ser de 10 Vdc.

- Resistencia de aislamiento

Es la resistencia a la corriente directa entre una célula de carga y su circuito.

## 2.5. Configuración de una célula de carga

Cuando se aplica una fuerza externa, las tensiones generadas en el material que se deforma se transforman en un cambio de resistencia de las bandas extensiométricas como se ha explicado en este capítulo. Puesto que el cambio en las resistencias es muy pequeño, se utiliza un puente de Wheatstone, un circuito que sirve para detectar pequeños cambios en resistencias. El puente de Wheatstone es un conjunto de cuatro resistencias como se muestra en la figura.

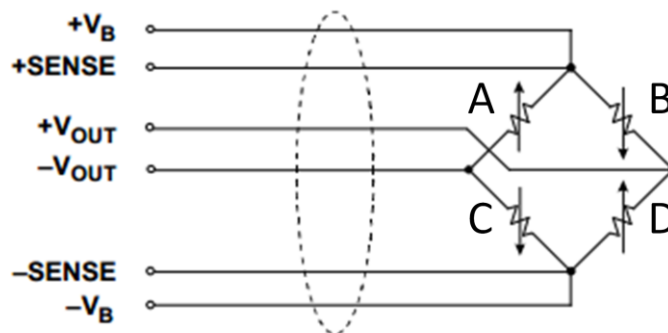


Ilustración 13 Diagrama de un puente de Wheatstone

Dependiendo del número de galgas usadas en la célula de carga, el puente de Wheatstone se usa en tres configuraciones distintas:

- Cuarto de puente

En esta configuración, sólo una galga extensiométrica (de las cuatro) se utiliza para detectar las tensiones y se usa por tanto solo una resistencia del puente de Wheatstone para medir. Las otras tres resistencias del puente completan un circuito de acondicionamiento de la señal.

- Medio puente

En esta configuración, dos galgas extensiométricas (A y B o C y D) están unidos a la célula de carga para detectar las tensiones y estas dos forman "dos brazos" del puente de Wheatstone. Las otras dos resistencias del puente completan el circuito de acondicionamiento de la señal.

- Puente completo

En esta configuración, todas las galgas extensiométricas están unidas a la célula de carga para detectar las tensiones. Esta configuración proporciona la máxima sensibilidad y no se ve afectada por los cambios de temperatura.

## 2.6. Selección de una célula de carga

Se deben tomar ciertos aspectos en consideración a la hora de seleccionar una célula de carga para una determinada aplicación:

- Capacidad

Se debe tener en cuenta la carga máxima que se medirá, seleccionando al menos una célula de carga que pueda medir un 10 % más de esta carga máxima.

- Rango dinámico

Si se selecciona una célula con una capacidad de carga muy elevada, esta no será muy precisa a la hora de medir pequeñas cargas, por tanto para poder tener precisión se deben tomar medidas entre el 10 % y el 90 % de la capacidad máxima de la célula.

- Forma

Se debe seleccionar una célula de carga con la forma adecuada en función del uso que se le vaya a dar. Por ejemplo se seleccionará una célula de carga de tipo S cuando la fuerza se aplique en ambos extremos.

Se deben tener en cuenta otros parámetros importantes como los rangos de salida, los rangos de temperatura, o la protección que se desee.



## **2.7. Matriz de calibración de una célula de carga**

Una célula de carga, como se ha comentado anteriormente, ofrece los resultados medidos en medidas eléctricas, voltios. Esto es útil si se combina con otro tipo de aplicaciones programables, por ejemplo al pasar de determinado valor de tensión abrir una válvula.

Pero si realmente lo que se quiere es saber el valor real de la fuerza o momento que la célula está soportando si la célula mide varias componentes como la usada en este proyecto se debe usar una matriz de calibración. Esta matriz es única para cada célula, debe ser bastante precisa y viene dada por el fabricante al adquirir la célula.

La matriz simplemente, al multiplicarse por el vector de medidas en voltios, nos da como resultados un vector con medidas de fuerza. Hallar la matriz de calibración es el objetivo de este proyecto, para ello se deben hacer las medidas lo más precisas posibles para obtener la mejor aproximación a la matriz original de la célula, realizada previamente por el fabricante en sus laboratorios de manera experimental.

## Capítulo 3

### 3. Diseño de la estructura

En este capítulo se estudiará el diseño de la estructura que soportará a la célula de carga, así como la estructura sobre la que se aplicarán las fuerzas. En la figura se muestra un esquema del montaje:

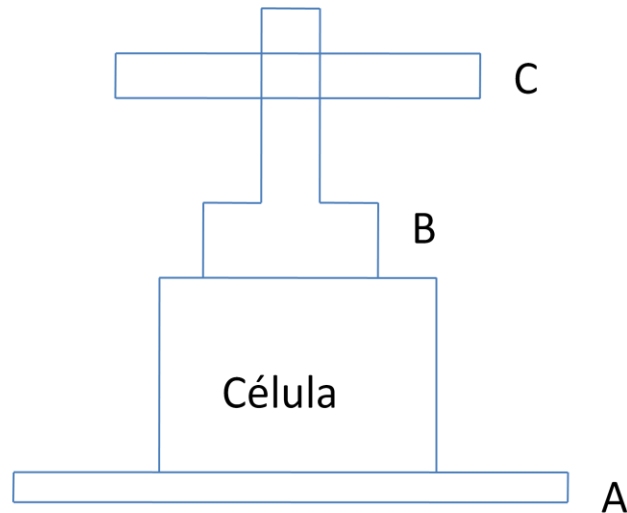


Ilustración 14 Esquema estructura

Se parte de disponer una mesa óptica y unos perfiles laminados que se usaran para crear estructuras y aplicar las fuerzas en distintas direcciones. Para poder atornillar la célula de carga a la mesa óptica se diseñara una base (A). Para poder aplicar fuerzas a distintas alturas se diseñara una parte superior que constara de dos piezas. La primera será una varilla que irá atornillada a la célula (B) en esta varilla se enroscará una placa (C) sobre la que se cargara la célula de carga mediante el uso de pesas y cable acerado. Se explicará el razonamiento que se realizará para seleccionar las dimensiones de la estructura, se explicarán los posibles problemas que pueden aparecer en la en los distintos elementos, y después se explicara cómo se realizó el diseño.

### 3.1. Estudio de la base

#### 3.1.1. Dimensiones de la placa

La mesa donde irá atornillada la placa dispone de agujeros M6 separados entre sí una pulgada (25.4mm).

Para realizar el diseño de las dimensiones de la placa, asumimos por comodidad que será cuadrada. Además se deben tener en cuenta dos cosas:

- Los taladros realizados en la placa, deben coincidir con los de la mesa, para ello ambos agujeros deberán estar separados una distancia exacta en pulgadas. En este caso se ha dejado una distancia de 5 pulgadas entre centros de taladros para operar con comodidad.

- Se debe dejar una distancia mínima de dos diámetros entre los centros de los taladros y el borde de la placa. En este caso  $2D=12$  cm. [5]

Por tanto el lado de la placa será:

$$L = (15 \cdot 2) + (25.4 \cdot 5) = 157 \text{ mm}$$

Quedando el diseño de la base de este modo, a falta de deducir el espesor que deberá tener.

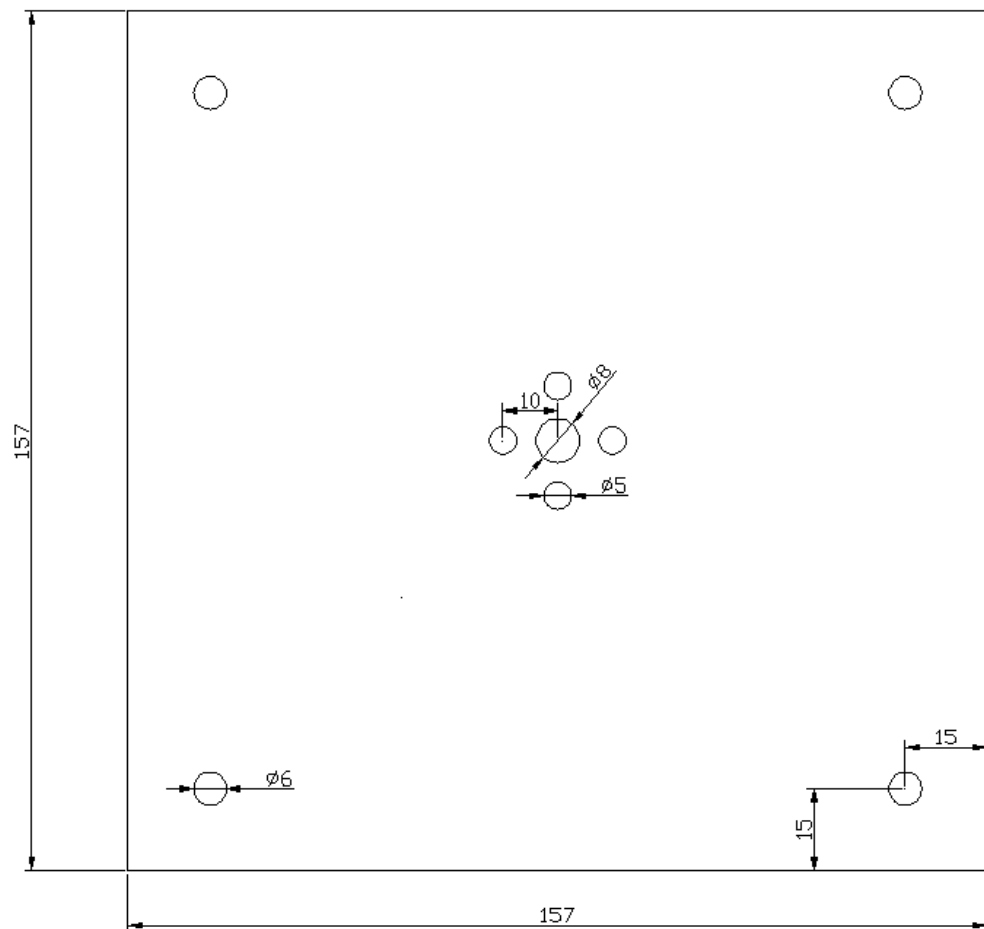


Ilustración 15 Plano base de la estructura

### 3.1.2. Estudio de la fuerza que soportan los tornillos

Para calcular la fuerza que soportan los tornillos se tendrá en cuenta separar el análisis para los tornillos interiores de la placa (son los que soportaran la célula) y los tornillos exteriores de la placa (los que unen la mesa a la placa).

#### 3.1.2.1. Tornillos interiores

Para realizar el análisis se tiene en cuenta el caso más desfavorable, que será cuando se apliquen todas las fuerzas y momentos máximos a la vez.

Las fuerzas y momentos máximos que se aplicarán son los especificados en el manual de la célula:

$$F_x = F_y = 100\text{N}$$

$$F_z = 200\text{N}$$

$$M_x = M_y = M_z = 10 \text{ Nm}$$

Para realizar el estudio se aplica el teorema de superposición, separando el estado inicial en 2 estados, el primero  $F_x + F_y + M_x + M_y$  y el segundo  $F_z$  y  $M_z$ .

- Para el estudio del primer estado,  $(F_x + F_y + M_x + M_y)$  obtenemos las resultantes del sumatorio de fuerzas:

$$M_0 = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$$

$$F_0 = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

La vista superior será:

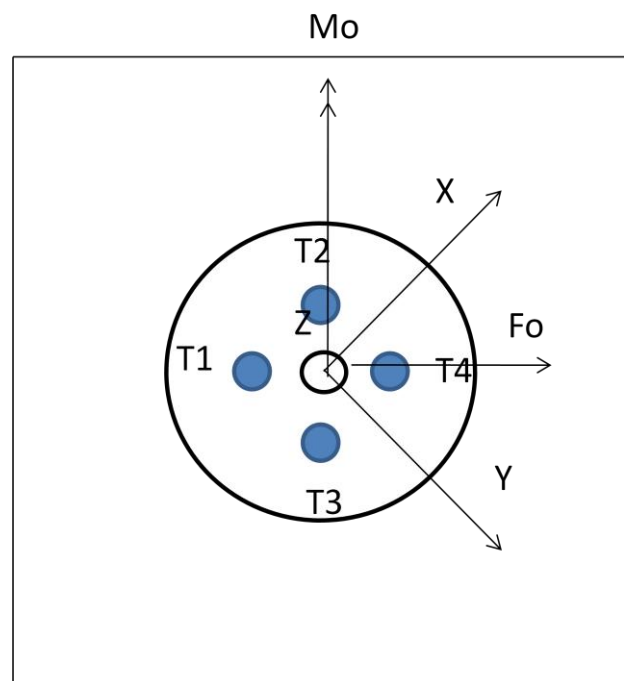


Ilustración 16 Vista superior de la célula de carga en la base

La distribución de fuerzas tendrá la forma que se muestra en la figura, ya que los tornillos T2, T3, T4 están solamente sometidos a compresión. Por tanto se reduce a calcular la expresión de una carga aplicada distribuidamente de forma triangular  $f(x) = a \cdot x + b$  empezando en T1, donde si aplicamos condiciones de contorno se obtiene que la constante b es 0.

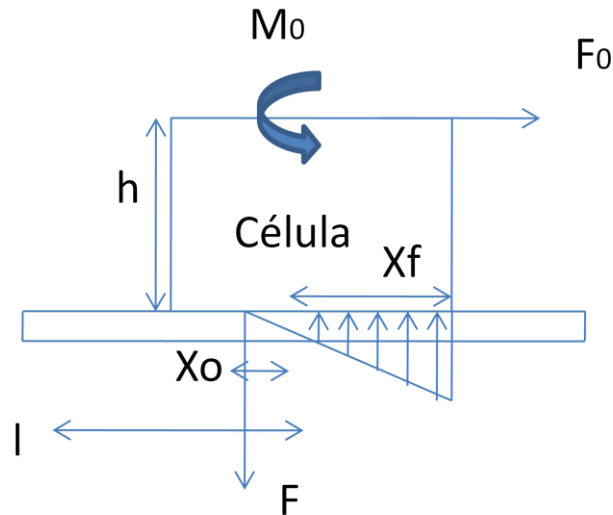


Ilustración 17 Diagrama de fuerzas desarrollado en la célula sujeta a la placa

Y observando la distribución de fuerzas representada en la figura, se realizan dos integrales de superficie, planteando en la primera igualdad de fuerzas, en la segunda igualdad de momentos, (teniendo en cuenta la geometría de la célula) y con estas dos ecuaciones sacar el valor de la constante  $a$  (primera incógnita) y el valor de la fuerza a tracción  $F$  (segunda incógnita).

$$F = \int_{x_0}^{x_f} 2 * a * x * \sqrt{R^2 - x^2} dx$$

$$F * l = M_0 + F_0 * h - \int_{x_0}^{x_f} 2 * a * x^2 * \sqrt{R^2 - x^2} dx$$

Donde  $X_0, X_f, l, h$  y  $R$  son parámetros que dependen de la geometría de la célula y son:

$X_0 = -1$  mm (inicio distribución de fuerzas)

$X_f = 35$  mm (fin distribución de fuerzas)

$l = 7.07$  mm (distancia del tornillo al centro de la célula)

$h = 44$  mm (altura célula)

$R = 35$  mm (Radio célula)

Finalmente el cortante se distribuye de igual manera entre los 4 tornillos y se obtiene como resultado resolviendo el sistema, que el tornillo que soporta más fuerza es el tornillo más alejado (T1), con unos valores de:

$$F = 735.54 \text{ N}$$

$$Q=25N$$

- Para el estudio del segundo estado ( $F_z+M_z$ ) se observa que por simetría  $F_z$  se reparte entre los cuatro tornillos, y  $M_z$  se reparte en forma de cortantes en distintas direcciones pero del mismo modulo entre los 4 tornillos siendo sus valores de:

$$F = \frac{F_z}{4} = 50N$$

$$Q = \frac{M_z}{4 * l} = 353.61N$$

En el estudio de las fuerzas cortantes, al hacer la suma, es una suma vectorial, y el caso más desfavorable se produce cuando ambos vectores están alineados llevando la misma dirección y sentido por tanto se puede afirmar que en el caso más desfavorable las fuerzas y cortantes que soportaran cada tornillo serán de:

$$F= 785.54 N$$

$$Q= 388.96 N$$

### 3.1.2.2. Tornillos exteriores

Para analizar que tornillos exteriores se deben usar, hay que tener en cuenta que se debe repetir el planteamiento realizado para los tornillos interiores, repitiendo el procedimiento, y teniendo en cuenta que los esfuerzos a tracción y compresión, es decir, teniendo en cuenta que los esfuerzos en el eje z los acabará soportando la mesa, se llega a la conclusión de que el esfuerzo más desfavorable observado soportado por los tornillos es de 46.178N, un esfuerzo muy inferior al de los tornillos interiores.

A la hora de realizar el análisis de los tornillos exteriores se plantearon dos alternativas para situar la célula en la base:

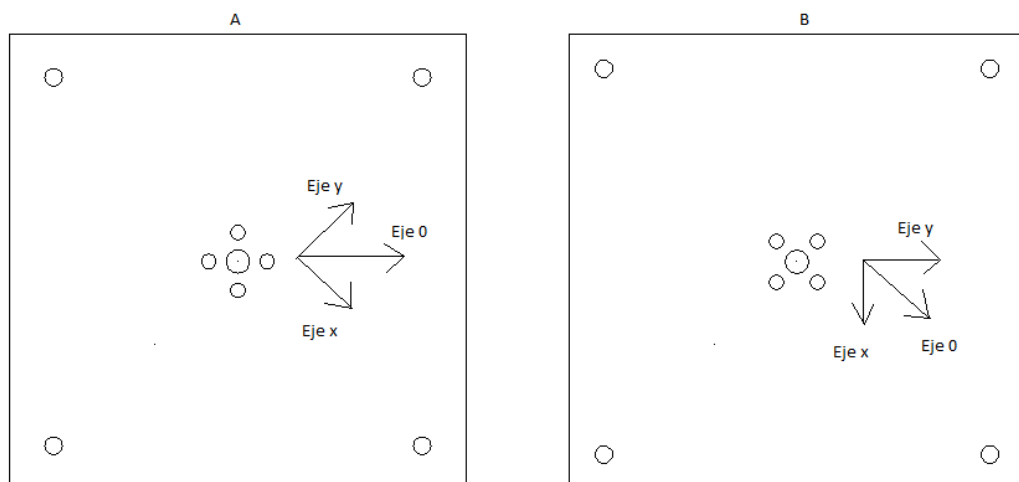


Ilustración 18 Planos de las dos posibles posibilidades

Teniendo en cuenta que las fuerzas más grandes, irán en el denominado Eje 0 en la figura, en la opción B solo soportaría las fuerzas un tornillo, mientras que en la opción A la fuerza la soportarían dos, por eso escogemos la opción A, con la que la fuerza soportada por cada tornillo será inferior que en la opción B.

### 3.1.3. Selección de tornillos

#### 3.1.3.1. Tornillos interiores

Una vez conocidas las fuerzas a tracción que soportaran los tornillos, se procede a verificar que tipo de tornillos se deben seleccionar, debiendo ser capaces de soportar los esfuerzos a los cuales se van a someter, para ello calculamos un margen de seguridad con la siguiente fórmula:

$$Ms = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{F}{F_{ma}}\right)^2 + \left(\frac{Q}{Q_{ma}}\right)^2}} - 1$$

Donde se obtienen los siguientes resultados para las distintas calidades de los tornillos de métrica 5 aplicando las fuerzas y cortantes máximas que soportara la placa obteniendo los diferentes márgenes de seguridad:

Material	F <sub>ma</sub> (MPa)	Q <sub>ma</sub> (MPa)	A(mm <sup>2</sup> )	F/F <sub>ma</sub>	Q/Q <sub>ma</sub>	Ms
4.6	400	400	14,51465	0,13530123	0,06699438	5,62343601
5.6	500	500	14,51465	0,10824098	0,05359551	7,27929502
5.8	500	500	14,51465	0,10824098	0,05359551	7,27929502
6.8	600	600	14,51465	0,09020082	0,04466292	8,93515402
8.8	800	800	14,51465	0,06765062	0,03349719	12,246872
10.9	1000	1000	14,51465	0,05412049	0,02679775	15,55859
12.9	1200	1200	14,51465	0,04510041	0,02233146	18,870308

Tabla 1 Obtención de márgenes de seguridad

Se observa que todos soportan los esfuerzos holgadamente al obtener márgenes de seguridad altos, por tanto se seleccionan los de calidad 4.6 por ser más baratos.

[6]



### 3.1.3.2. Tornillos exteriores

Sabiendo que el esfuerzo más desfavorable observado soportado por los tornillos es de 46.178N, el cual es un esfuerzo muy inferior al de los tornillos interiores. Teniendo en cuenta esto se vuelven a seleccionar los tornillos de la misma calidad, 4.6 pero de métrica 6.

### 3.1.4. Análisis de aplastamiento

Consiste en el aplastamiento de las caras laterales del remache debido a la compresión realizada por las chapas. La distribución de tensiones es compleja, por lo que se considera un modelo simplificado, según el cual, la tensión se obtiene considerando, como área resistente a compresión, la proyección diametral del área de contacto. La tensión de aplastamiento más desfavorable estará en la chapa más delgada

#### 3.1.4.1. Tornillos interiores

Para calcular la tensión máxima que soporta el material se debe calcular la fuerza máxima que soporta el material  $F_{mat}$ , sabemos que:

$$Cs = \frac{F_{mat}}{Q}$$

Se decide tomar como coeficiente de seguridad  $Cs=1.1$  y siendo  $Q = 388.96N$  calculado anteriormente se obtiene:

$$F_{mat} = F * Cs = 388.96 * 1.1 = 427.86N$$

Y relacionando la  $F_{mat}$  con el diámetro del tornillo el espesor de la placa y el límite elástico del aluminio:

$$F_{mat} = F_{bru} * d * t = 723.95 \left( \frac{N}{mm^2} \right) * 4.30(mm) * t(mm)$$

De donde se obtiene el espesor:

$$t = \frac{F_{mat}}{F_{bru} * d} = \frac{427.86}{723.95 * 4.3} = 0.14mm$$

El coeficiente de aplastamiento  $F_{bru}$  tiene valor de 105 ksi ( $723.95 \left( \frac{N}{mm^2} \right)$ ) para el aluminio 2017 [7]  
El diámetro en la base de un tornillo de métrica 5 es 4.30mm.

#### **3.1.4.2. Tornillos exteriores**

Al ser de mayor tamaño que los interiores, será más crítico el análisis de los tornillos interiores por tanto no es necesario repetir el análisis de aplastamiento para este caso.

### 3.2. Estudio de la varilla

Se necesita una estructura con forma de columna donde aplicar las fuerzas con dinamómetros y crear los momentos que soporta la célula.

Se aplicará como máximo una fuerza de 100 N (Fuerza máxima que aguanta la célula), por tanto si quiere poder crear los momentos máximos de 10 Nm, se necesita aplicar la fuerza a una distancia de:

$$L = \frac{M}{F} = \frac{10Nm}{100N} = 0.1m = 10cm$$

La cual es una altura cómoda para trabajar. Para el cálculo del ancho de la columna, lo que se intentará será garantizar que la flecha sea lo menor posible. Para ello se escogerá como un valor razonable de flecha 0,1 % de la longitud, es decir 0,1 mm.

Este caso es el de una viga empotrada en un extremo y libre en el otro sobre el que se aplicarán 2 fuerzas, axial y cortante, pero solo generará flecha la fuerza cortante F, y realizando un estudio de reacciones y momentos flectores se obtiene el siguiente resultado:

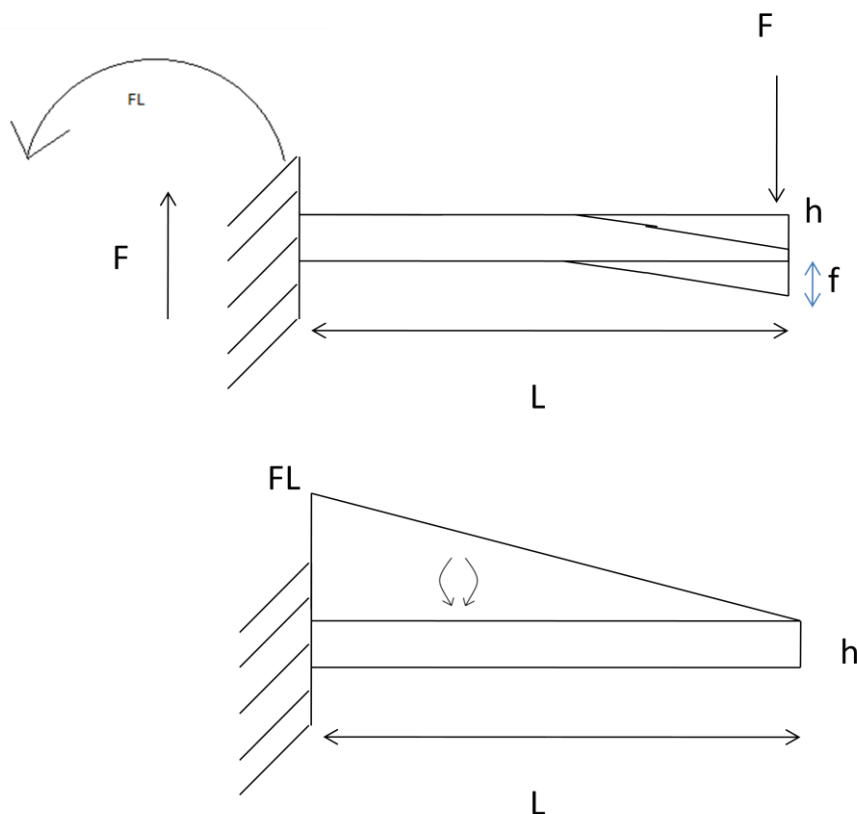


Ilustración 19 Estudio de la flecha en el extremo del cilindro

Para sacar la flecha se aplicarán los teoremas de Mohr concretamente:

$$f = \frac{A * Xg}{EI} = \frac{\frac{FL^2}{2} * \frac{2}{3}L}{EI} = \frac{FL^3}{3EI}$$

$Xg$  = Distancia del centro de gravedad de la distribución de fuerzas

La flecha irá en el sentido de la fuerza.

Para poder sacar el valor del ancho denominado h en la figura sabemos que:

$$F=100N$$

$$L=100mm,$$

$$E=69000MPa$$

$$I = \frac{1}{4} \pi * h^4$$

$$f=0.1mm$$

[1]

Sustituyendo en la flecha y despejando h se obtiene:

$$h = \sqrt[4]{\frac{4 * F * L^3}{3 * f * E * \pi}}$$

Sustituyendo valores se obtiene  $h=8.856mm$ . Por tanto se seleccionará para tener una métrica M10 un valor de 10mm. Respecto a la base de la estructura, deberá poder atornillarse a la parte superior de la célula, por tanto deberá ser una circunferencia de diámetro 30 mm donde centrada en ella irán situados los distintos taladros igual que en la unión de la célula a la placa que forma la base. Como la geometría es similar a la de la base, se puede concluir que el análisis de aplastamiento (bearing), y de los tornillos es equivalente. El espesor de la base de la columna será el mismo que el de la base de la estructura.

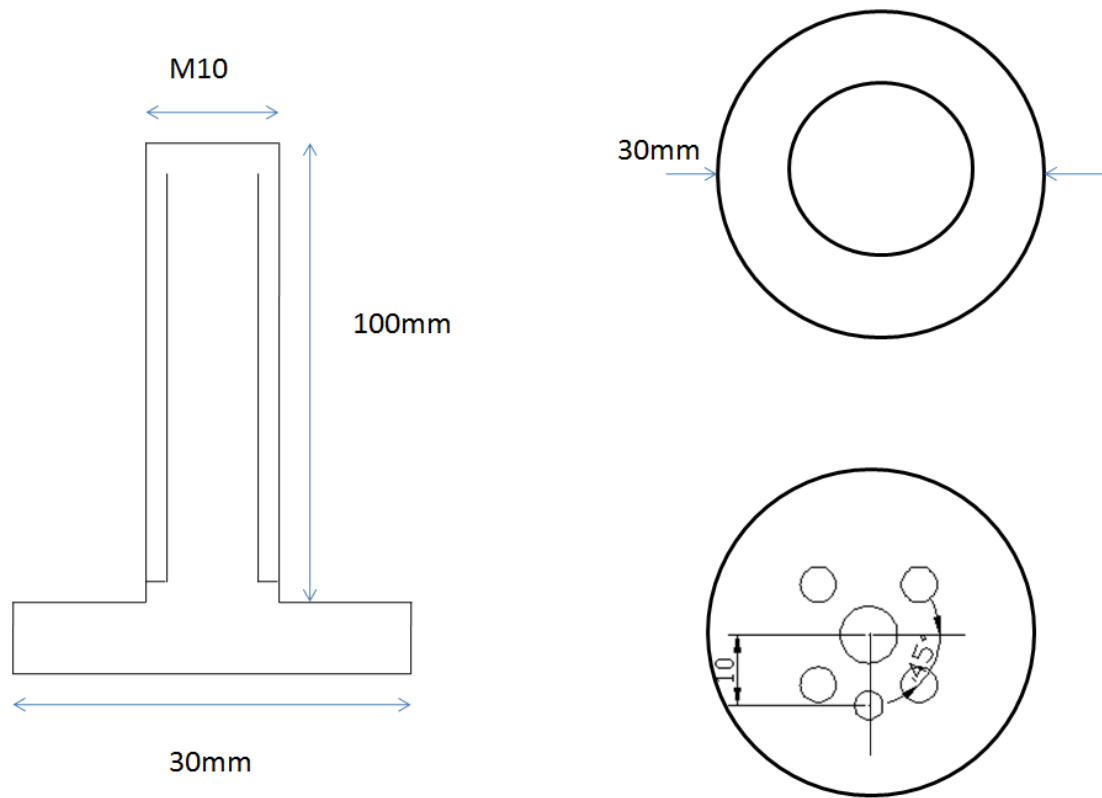


Ilustración 20 Planos cilindro superior

### 3.3. Estudio de la placa que soportará las fuerzas

Se debe diseñar una placa rectangular que irá enroscada a la parte superior de la estructura con el fin de poder realizar todas las fuerzas y momentos posibles sobre la célula. Para ello sobre la célula se deberá poder aplicar fuerzas como mínimo a una distancia de 5 cm a cada lado respecto el centro, para con la fuerza máxima que aguanta la célula poder crear el momento máximo. A esta distancia de 5 cm se deben hacer unos taladros lo suficientemente grandes para que pase un cable que soportara las fuerzas en distintas direcciones. Para cambiar la dirección de las fuerzas aplicadas se usaran poleas, y para generar una fuerza constante se usaran pesas. Se debe dejar una distancia de seguridad desde los taladros hasta el borde, y tal como se vio en el diseño de la estructura de la base, deberá de ser de dos veces el diámetro de los taladros. Los taladros se realizaran de un diámetro de 1.2 mm con el fin de que pueda entrar un hilo acerado de 1 mm de grosor. El talado mayor será de M10 roscado que será por donde entre la placa a la parte superior, y delimitara el ancho de la placa teniendo en cuenta las distancias de seguridad a los bordes, el ancho será de:

$$10+2*10+2*10=50 \text{ mm}$$

$$\text{La longitud de la placa será de } 100 + 2 * 1.2 + 2 * 1.2 = 104.8 \text{ mm}$$

Finalmente por comodidad a la hora de operar del operario se escogen unas dimensiones finales de la placa de 110x50mm, faltando por determinar el espesor. Para tener una estimación del espesor mínimo necesario se procede a realizar un estudio como el de la parte superior de la placa donde se pone como condición que la placa no tenga una flecha superior a 0.1mm. Siendo el mismo caso que el anterior se obtenía:

$$f = \frac{FL^3}{3EI}$$

Donde

$$F=50 \text{ N}$$

$$L=50 \text{ mm}$$

$$E=69000 \text{ MPA}$$

$$f=0.1 \text{ mm}$$

$$I = \frac{1}{12} Le^3$$

De donde en la primera ecuación se obtiene un momento de Inercia necesario de  $301.93 \text{ mm}^4$  y sustituyendo en la ecuación del momento de inercia y despejando el espesor se obtiene un espesor de 4,17 mm

Por tanto se selecciona un espesor de 5 mm.

## Capítulo 4

### 4. Amplificadores

La célula de carga presenta un inconveniente a la hora de realizar medidas, puesto que la señal eléctrica que transmite es del orden de micro voltios, siendo imposible medir las seis señales usando voltímetros convencionales.

Se pueden optar por dos soluciones para este problema:

- Comprar voltímetros de alta precisión que permitan tomar medidas precisas.
- Diseñar un amplificador que amplifique las señales transmitidas por la célula para después poder ser medidas en voltímetros normales.

Puesto que la compra de voltímetros es bastante cara (pueden llegar a valer 700 € [8]), se ha optado por la segunda opción, realizar el diseño de un amplificador que se llevará a cabo por la oficina técnica de electrónica de la universidad Carlos III de Madrid.

Para poder llevar a cabo el diseño, se toma una medida experimental para poder conocer exactamente qué orden de ganancia debe ofrecer el amplificador, y finalmente se usa un amplificador de 6 canales, teniendo cada canal las siguientes características:

- Entrada diferencial, para conectar a la salida diferencial de un puente de Wheatstone.
- Salida single-ended de 0 a 5V, con tensión de salida de 2,5V nominales en reposo (en la práctica, debido a las tolerancias y errores en los puentes de cada canal de la célula de carga y de la propia electrónica, esta tensión puede variar).
- Ancho de banda de 0 a 500Hz.
- Ganancia de 2.000 V/V.

Se adjuntan esquemas del amplificador en el [anexo 1](#).

## Capítulo 5

### 5. Realización de los ensayos

#### 5.1. Medidas realizadas

Con el objetivo de reducir al máximo el error en las medidas se realizan más medidas de las estrictamente necesarias, obteniendo un sistema sobredimensionado que se optimizará usando MATLAB ajustando por mínimos cuadrados la solución. Las ecuaciones mínimas que se deberán obtener son 36, puesto que se tienen 36 elementos en la matriz que se desea obtener. Lo ideal será realizar medidas de cada fuerza y momento por separado, pero esto no es posible, puesto que al aplicar una fuerza se generan momentos en otro eje, y para generar los momentos se necesita crear fuerzas. Lo que teóricamente es posible realizar, es la aplicación de fuerzas por separado, al igual que la de momentos compensando las fuerzas que generen entre sí, pero debido al grosor de la estructura resulta inviable aplicar fuerzas sin cierta distancia en el eje z, y por tanto es imposible crear fuerzas puras en cualquiera de los ejes. Por tanto se ha optado por realizar las medidas dentro de las posibilidades que se tienen aunque esto no sea lo idóneo permitirá acercarse a la matriz de calibración.

Para empezar, por especificaciones del amplificador, si no se carga la célula la salida que se obtiene no es 0V, varía entre 0 y 5 V por tanto es indispensable tener en cuenta esos valores que se ven reflejados como:

1.992718 2.277098 1.447605 1.494578 0.545272 2.463563

$\epsilon F_x = 1,992718 \text{ V}$

$\epsilon F_y = 2,277098 \text{ V}$

$\epsilon F_z = 1,447605 \text{ V}$

$\epsilon M_x = 1,494578 \text{ V}$

$\epsilon M_y = 0,54272 \text{ V}$

$\epsilon M_z = 2,463563 \text{ V}$

Que corresponden a las salidas de tensión cuando no se aplica ninguna fuerza ni ningún momento, y se usarán para fijar el cero. Para centralizar el valor 0 V con una fuerza de 0 N se restarán estos valores a cada medida que se haga. Durante la toma de medidas se observa que al no aplicarse fuerza o momento en un eje su salida no es significativa respecto a



cuando no se aplican fuerzas. Esto quiere decir que la matriz de calibración debe ser principalmente una matriz diagonal.

Se observa que los valores que se miden en cada caso de carga muestran cierto ruido, es decir estos valores oscilan. Para obtener más precisión y eliminar este ruido, mediante el uso de LabView se toman medidas cada 200 ms durante aproximadamente 10 s obteniendo 50 medidas para el mismo caso de carga. Estas medidas se guardan en un archivo .txt y en Matlab se realiza una media de estos valores reduciendo notablemente el error del ruido al medir.

Para este proyecto, no se usan pesos superiores a 4 kg, puesto que alguna salida del amplificador tiende a saturarse, es decir, el amplificador da valores mínimos de 0 V y máximos de 5 V. Al aplicar una carga de 6 kg la salida que se obtiene es 5 V, e igual para una carga de 8 kg, por tanto se ha decidido hacer las medidas variando las cargas de 1 a 4 kg para obtener una mejor aproximación a la matriz de calibración, evitando así entrar en la zona de saturación.

Se pueden observar distintas fotos del montaje así como una captura de pantalla de LabView en el [anexo 2](#). Debido al tamaño de las medidas realizadas con tantos decimales y 84 casos distintos, las medidas se incluyen también en el [anexo 2](#).

## Capítulo 6

### 6. Cálculo de la matriz de calibración

#### 6.1. Explicación del método empleado

Una vez se han tomado las medidas necesarias, se debe resolver un sistema lineal de 36 incógnitas. Además para obtener más precisión es recomendable obtener más ecuaciones que incógnitas e interpolando se obtendrán los distintos elementos de la matriz de manera más precisa en función del número de ecuaciones que se haya obtenido. Más medidas, más precisión.

Algebraicamente el problema que se quiere resolver es el siguiente:

$$a * X = b$$

Donde:

$a$ = El vector de medidas que ofrece la matriz de calibración, de dimensiones (1x6).

$X$ =La matriz de calibración la cual queremos hallar y posee unas dimensiones de (6x6).

$b$ =El vector fuerzas que refleja las fuerzas reales aplicadas en ese momento de dimensión (1x6)

Por tanto una vez hallada la matriz de calibración, al multiplicar el vector  $a$  por la matriz  $X$  se obtendrán las fuerzas aplicadas.

Para obtener la matriz de calibración, el vector  $a$  aumentara su número de filas en función de las medidas que se han tomado, cada medida representara una fila. Igualmente sucede con el vector  $b$ . Lógicamente, las filas de estos dos vectores están relacionadas y no se deben modificar, es decir si una medida se coloca en la fila 4 de la ahora la nueva matriz  $A$ , en la nueva matriz  $B$  se debe colocar las fuerzas referentes a esa medida en la fila 4.

Por tanto se tiene:

$$A * X = B$$

Donde:

$A$ =Matriz de medidas de dimensiones (i x 6) donde i es el número de medidas que hayamos tomado.

$X$ =La matriz de calibración la cual queremos hallar y posee unas dimensiones de (6x6).

$B$ =Matriz de fuerzas relacionada con la matriz  $A$  de también dimensiones (i x 6).

Para resolver esta ecuación matricial, se debe poder invertir la matriz  $A$ , como es de dimensiones  $(i \times 6)$ , no está asegurado que vaya a ser una matriz cuadrada y por tanto invertible. Como la solución no es exacta nunca se cumplirá que  $A * X = B$  y se debe hacer una aproximación.

Para solucionar este problema se ha optado por emplear el método de mínimos cuadrados que consiste en multiplicar la ecuación a ambos lados por la matriz  $A$  traspuesta, y con ello conseguir minimizar la norma 2 obteniendo lo siguiente:

$$A^t * A * X = A^t * B$$

Desarrollando y despejando  $X$ :

$$(A^t * A)^{-1} * (A^t * A) * X = (A^t * A)^{-1} A^t * B$$

$$X = (A^t * A)^{-1} A^t * B$$

Una vez obtenida esta expresión matricial con la cual calcular la matriz de calibración, se opta por introducir manualmente en MATLAB en un fichero .m las matrices  $A$  y  $B$  e introducir la expresión hallada anteriormente, obteniendo la matriz de calibración. [9]

Se puede observar el código del programa empleado en el [anexo 3](#).

## 6.2. Resultados

Realizando los pasos explicados en el apartado anterior se obtiene la siguiente matriz de calibración:

4684.2	48.9	24.4	-17.3	-1326.2	181.4	$\times 10^3$
8.5	6370.9	19.4	-2609.3	-18	6.1	
-7.9	-4.1	7029.6	-1.1	46.3	14	
2.2	722.2	-17.9	2866.9	11.8	-3.5	
-450	-18.5	5.3	-6.6	2.9210	-415.7	
3.2	-15.4	9.4	-6.9	-84.2	1570.2	

Tabla 2 Matriz de calibración experimental

### 6.2.1 Análisis de los resultados

El objetivo del proyecto es hallar la matriz de calibración de una célula de carga, para poder evaluar el resultado final, es conveniente comparar la matriz hallada con la matriz de calibración que nos ofrece el fabricante. A continuación se exponen las dos matrices para comparar el resultado obtenido:

4684.2	48.9	24.4	-17.3	-1326.2	181.4	$\times 10^3$
8.5	6370.9	19.4	-2609.3	-18	6.1	
-7.9	-4.1	7029.6	-1.1	46.3	14	
2.2	722.2	-17.9	2866.9	11.8	-3.5	
-450	-18.5	5.3	-6.6	2.9210	-415.7	
3.2	-15.4	9.4	-6.9	-84.2	1570.2	

Tabla 3 Matriz de calibración experimental

2274.29	22.34	8.58	-8.25	-722.96	7.15	$\times 10^{-6}$
4.13	3078.84	9.27	-1261.32	-4.11	7.08	
-1.19	-2.22	3395.34	-0.54	3.34	-3.77	
0.14	347.56	-8.44	1385.92	6.35	0.4	
-238.84	-6.62	3.50	-3.33	1566.56	-1.48	
-3.64	-6.67	5.33	-3.43	-3.79	891.37	

Tabla 4 Matriz de calibración dada por el fabricante

Comparando ambas matrices se observa que principalmente tienen la misma estructura, es decir los elementos que son dominantes en una, como la diagonal, son dominantes en la otra, pero que los elementos de la matriz no son parecidos. Esto es debido a que el fabricante da la relación directa de entrada y salida de la célula de carga y en este proyecto se ha usado un amplificador, por tanto la matriz obtenida debería ser proporcional a la matriz del fabricante, y esta proporcionalidad viene dada por el amplificador, el cual tiene una ganancia de  $2 \cdot 10^3$  V/V. Además, el fabricante da su resultado para poder ser medido en microvoltios, y en los experimentos se ha medido en voltios, esto supone un factor adicional de  $10^6$  para cambiar las unidades. Si ahora dividimos la matriz experimental entre este factor de  $k = 2 \cdot 10^3 \cdot 10^6 = 2 \cdot 10^9$ :

2342.1	24.4	12.2	-8.6	-663.1	90.7	$\cdot 10^{-6}$
4.2	3185.5	9.7	-1304.7	-9	3.1	
-4	-2	3514.8	-0.6	23.2	7	
1.1	361.1	-9	1433.4	5.9	-1.8	
-225	-9.3	-2.6	-3.3	1460.5	-207.8	
1.6	-7.7	4.7	-3.4	-42.1	785.1	

Tabla 5 Matriz experimental dividida entre el factor de proporcionalidad

### 6.3. Análisis de errores

Como se puede apreciar se ha obtenido finalmente un resultado que se aproxima bastante al resultado deseado. A continuación se muestran las dos matrices a la misma escala:

2342.1	24.4	12.2	-8.6	-663.1	90.7	$\cdot 10^{-6}$
4.2	3185.5	9.7	-1304.7	-9	3.1	
-4	-2	3514.8	-0.6	23.2	7	
1.1	361.1	-9	1433.4	5.9	-1.8	
-225	-9.3	-2.6	-3.3	1460.5	-207.8	
1.6	-7.7	4.7	-3.4	-42.1	785.1	

Tabla 6 Matriz experimental dividida entre el factor de proporcionalidad

2274.29	22.34	8.58	-8.25	-722.96	7.15	$\cdot 10^{-6}$
4.13	3078.84	9.27	-1261.32	-4.11	7.08	
-1.19	-2.22	3395.34	-0.54	3.34	-3.77	
0.14	347.56	-8.44	1385.92	6.35	0.4	
-238.84	-6.62	3.50	-3.33	1566.56	-1.48	
-3.64	-6.67	5.33	-3.43	-3.79	891.37	

Tabla 7 Matriz de calibración dada por el fabricante

Lo primero que se observa en la matriz del fabricante es que los términos significativos son los de la diagonal principal, y en menor medida los elementos (5,1), (4,2), (2,4) y (1,5). Los errores porcentuales de estos términos uno a uno so:

2.98				8.27		%
	3.46		3.43			
		3.51				
	3.89		3.42			
5.79				6.77		
					11.92	

Tabla 8 Matriz error

Analizando el resultado se observa que el error obtenido no es muy grande, en la mayoría de los casos (inferior al 5%) aun así existen ciertos términos cuyos errores podemos considerar algo superiores, esto es, debido a que a medida que los términos son menos significativos es más fácil cometer error en las medidas y aparece un error superior.

Por otro lado analizando el resto de términos se encuentra que los términos (1,6) y (5,6) tienen errores muy grandes, (mucho mayores del 100%). En el caso del término (1,6) el valor de 90,7 sigue siendo despreciable respecto a los términos de la diagonal, sin embargo el valor del término (5,6), -207.8 ya no se puede considerar tan despreciable. Para poder mejorar estos

resultados deberían tomarse mas medidas que relacionen el momento en Z con el momento en Y el momento en Z con la fuerza en X. Hay que tener en cuenta que los momentos que se están aplicando generan unas reacciones en voltios no muy grandes, lo cual hace que cualquier ligera variación en las medidas provoque cambios grandes en los resultados.

Este error que se obtiene es debido a diversos factores cabe destacar entre ellos el propio error de la célula (se puede observar en el [anexo 4](#)), el error de medida a la hora de alinear las fuerzas que se considera un error de un grado, es decir un error del  $\text{error} = \sin(1^\circ) * 100 = 1,75\%$  y el error en las pesas usadas para cargar la célula que es del 5%. Siendo estos los errores más significativos, se considera que el error obtenido es un error aceptable (alrededor del 5%) excepto en las medidas relacionadas con el momento en el eje Z que deberían poderse mejorar y en concreto el resultado del elemento (5,6)

## Capítulo 7

### 7. Conclusiones y futuras líneas de trabajo

#### 7.1. Conclusiones

Se ha conseguido el objetivo de este proyecto, calcular la matriz de calibración para una célula de carga con bastante precisión. Debido a la dificultad a la hora de realizar medidas completamente precisas aparece algún pequeño error si se compara con la matriz del fabricante, pero aun así es un resultado bastante fidedigno, excepto en el elemento (5,6)

Además se ha aprendido a cargar de manera práctica la célula de carga y se ha dejado un pequeño manual adjuntado en este proyecto para poder tomar medidas en el futuro, que se puede consultar en el [anexo 5](#).

Cabe destacar que la precisión de las medidas que posiblemente realice el fabricante para calcular la matriz de calibración sea muy superior a la realizada en este proyecto.



## 7.2. Futuras líneas de trabajo

Como futuras líneas de trabajo, se podría pensar en la realización de más medidas y de manera más compleja y precisa, por ejemplo usando pesas de precisión y realizando la combinación de más fuerzas y momentos juntos. De este modo la matriz de calibración sería más precisa.

También el método numérico empleado para resolver un sistema de ecuaciones sobredimensionado puede ser sustituido por otro más complejo y preciso, como el usado en filtros Kalman.

Si no dispusiésemos de la matriz dada por el fabricante, el uso de la matriz obtenida en este proyecto sería indispensable para poder usar la célula de carga. Aun así, la matriz que se ha obtenido es útil si se quieren realizar medidas usando el mismo amplificador que el empleado en este proyecto.

## Capítulo 8

### 8. Referencias

#### 8.1. Libros

- [5] MICHAEL C.Y. NIU  
*Airframe Stress Analysis and Sizing*
- [9] WALPOLE, RONALD E.  
*Probabilidad y estadística para ingenieros*

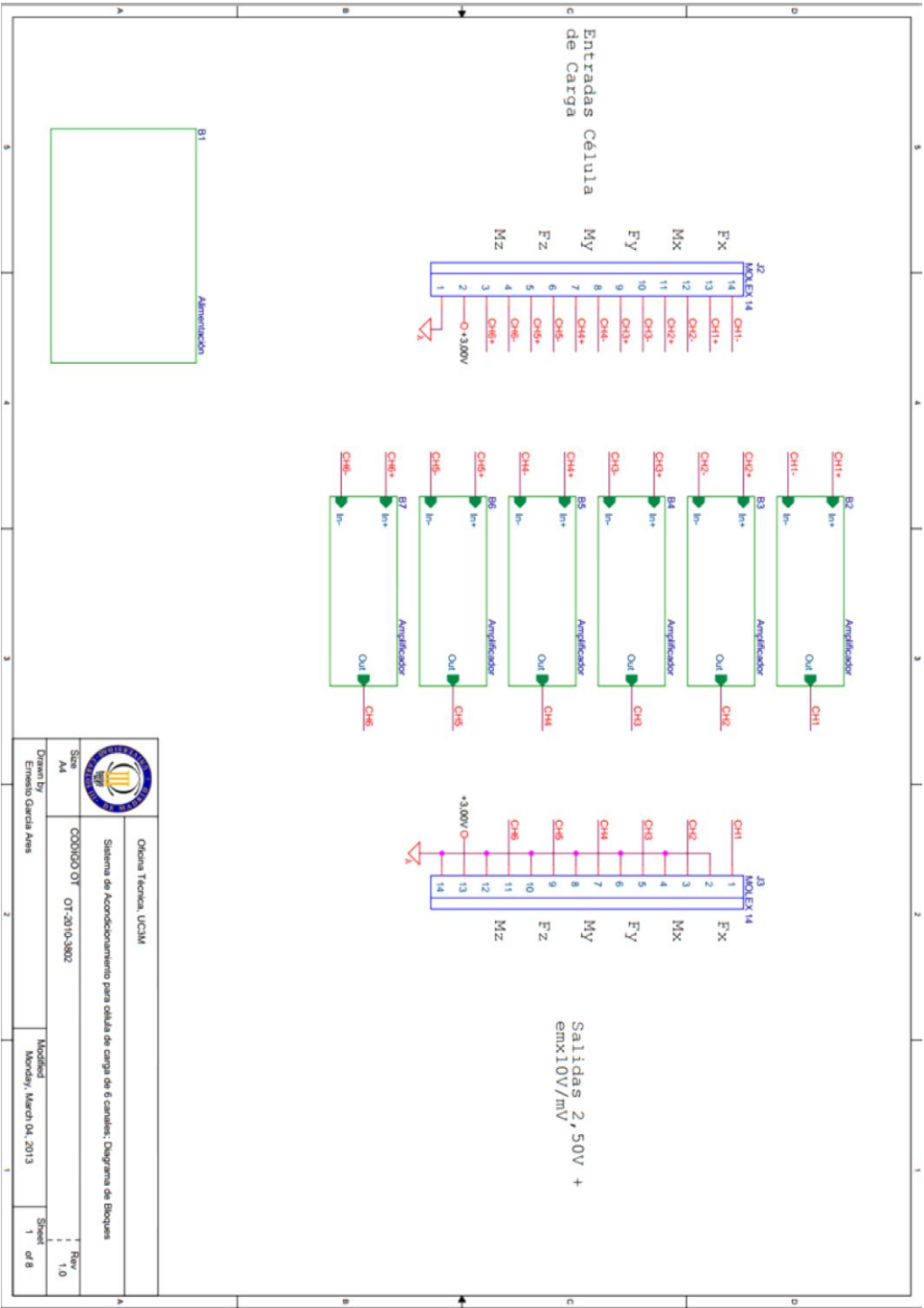
#### 8.2. Documentos electrónicos y páginas web

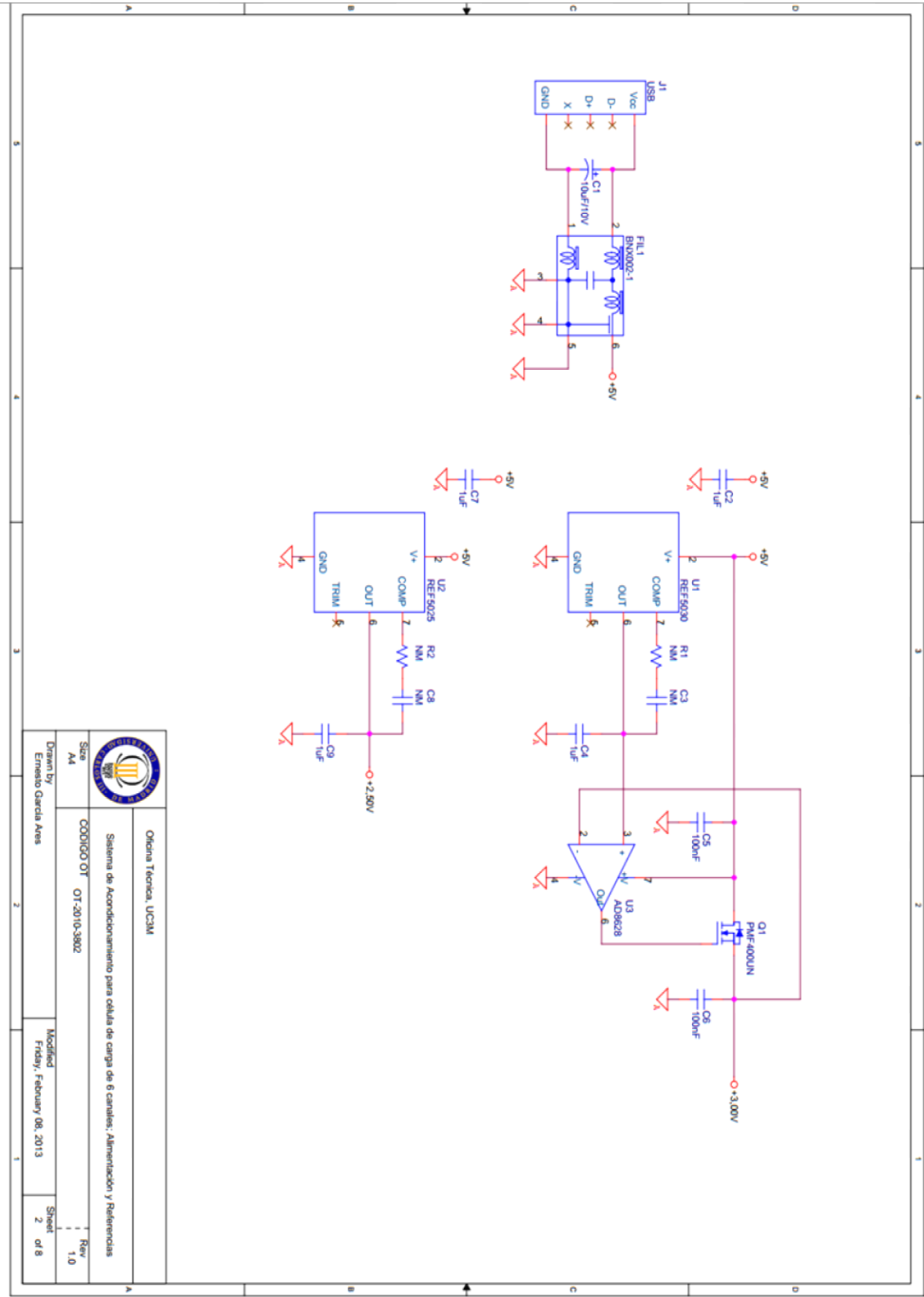
- [1] FUTEK Advanced Sensor Technology  
<http://www.futek.com/application/loadcells.aspx>
- [2] Engineers Garage  
<http://www.engineersgarage.com/articles/load-cell?page=1>
- [3] Wikipedia  
[http://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo\\_de\\_tracci%C3%B3n](http://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_de_tracci%C3%B3n)
- [4] A&D Company  
<http://www.aandd.jp/products/weighing/loadcell/introduction/pdf/5-1.pdf>
- [6] Wikipedia  
<http://es.wikipedia.org/wiki/Tornillo>
- [7] MIL-HDBK-5J  
[http://www.weibull.com/mil\\_std/mil\\_hdbk\\_5j.pdf](http://www.weibull.com/mil_std/mil_hdbk_5j.pdf)
- [8] Rigolna  
<http://www.rigolna.com/products/digital-multimeters/dm3000/dm3068/>


Capítulo 9

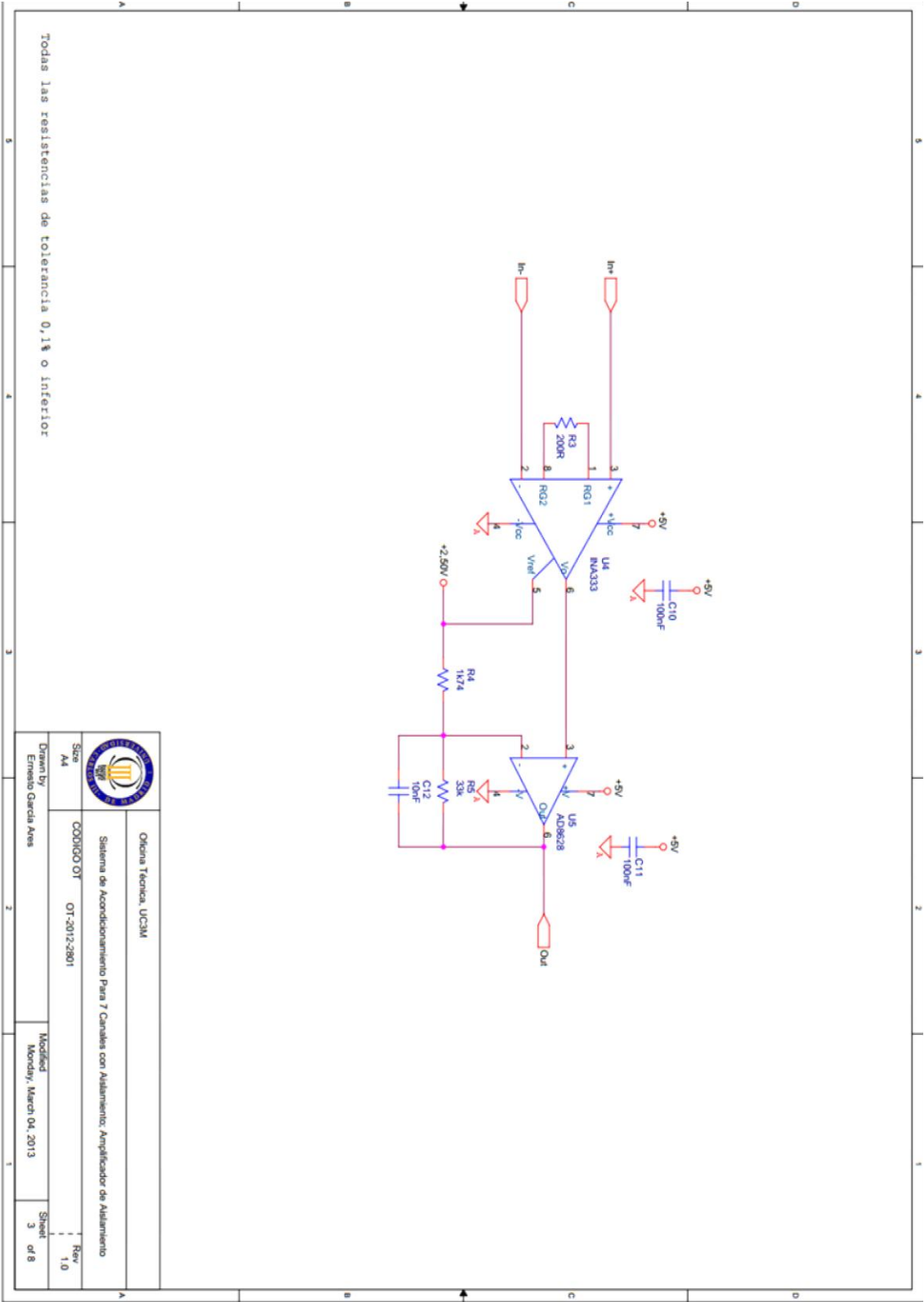
9. Anexos

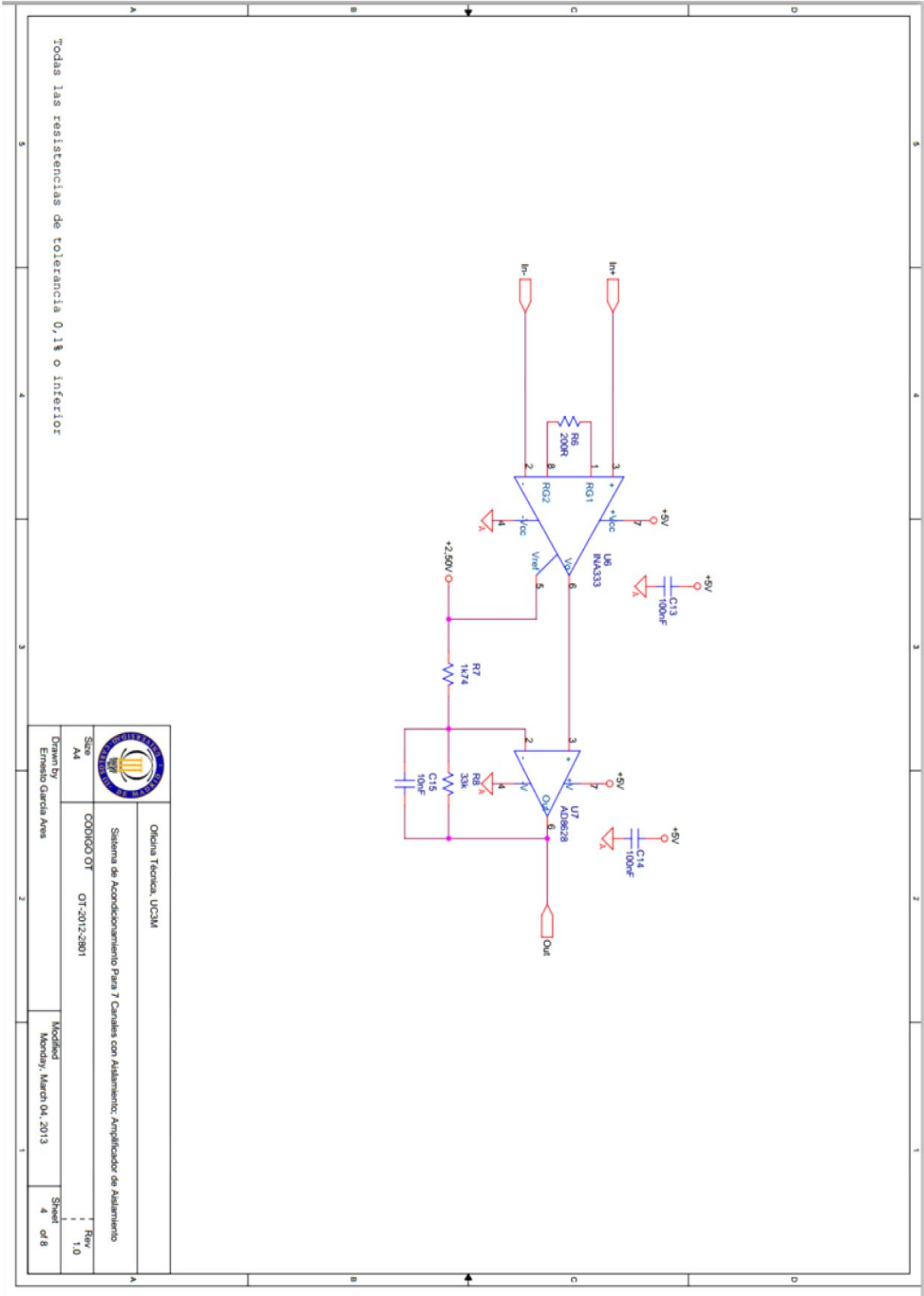
9.1. Esquemas del amplificador

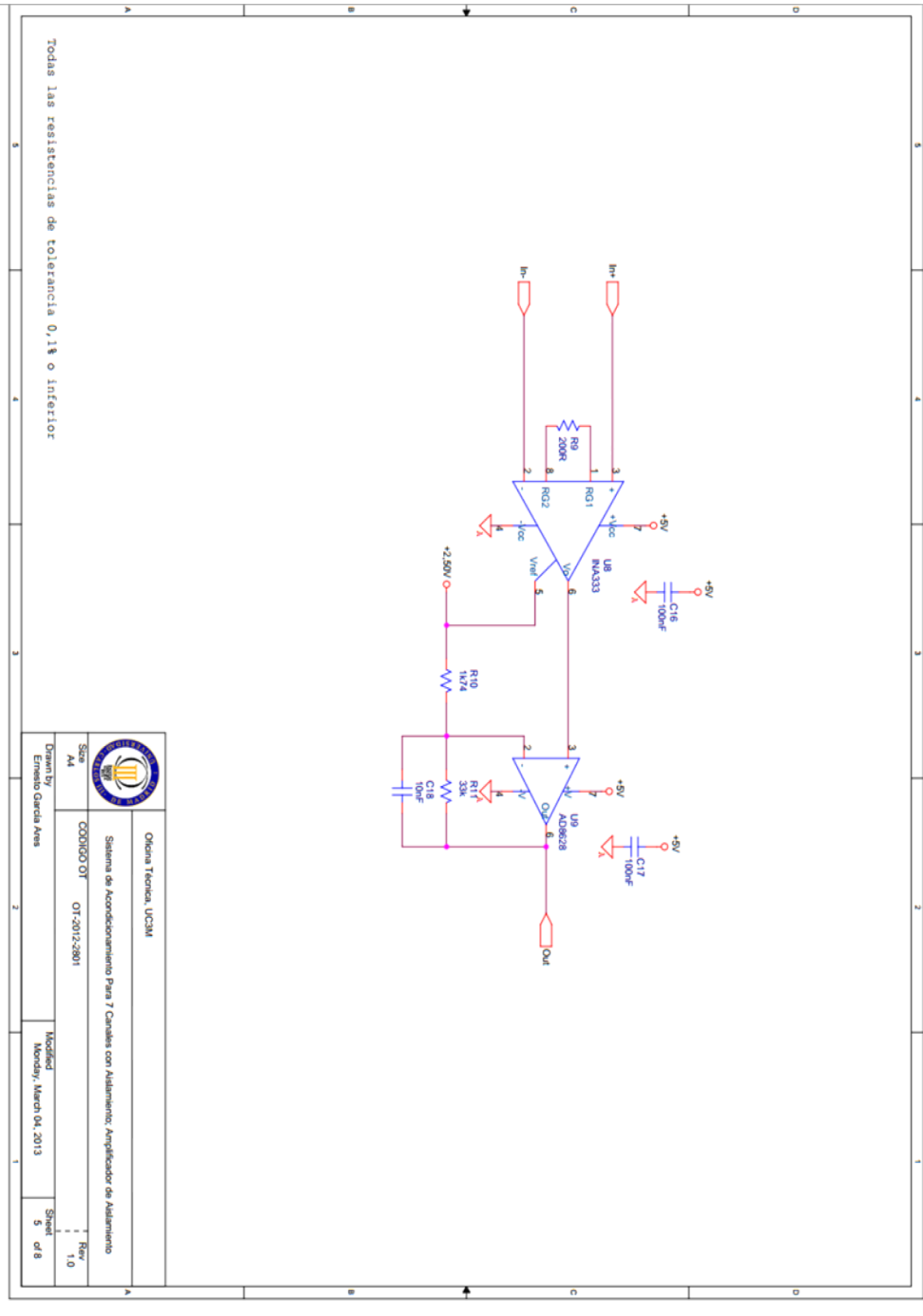


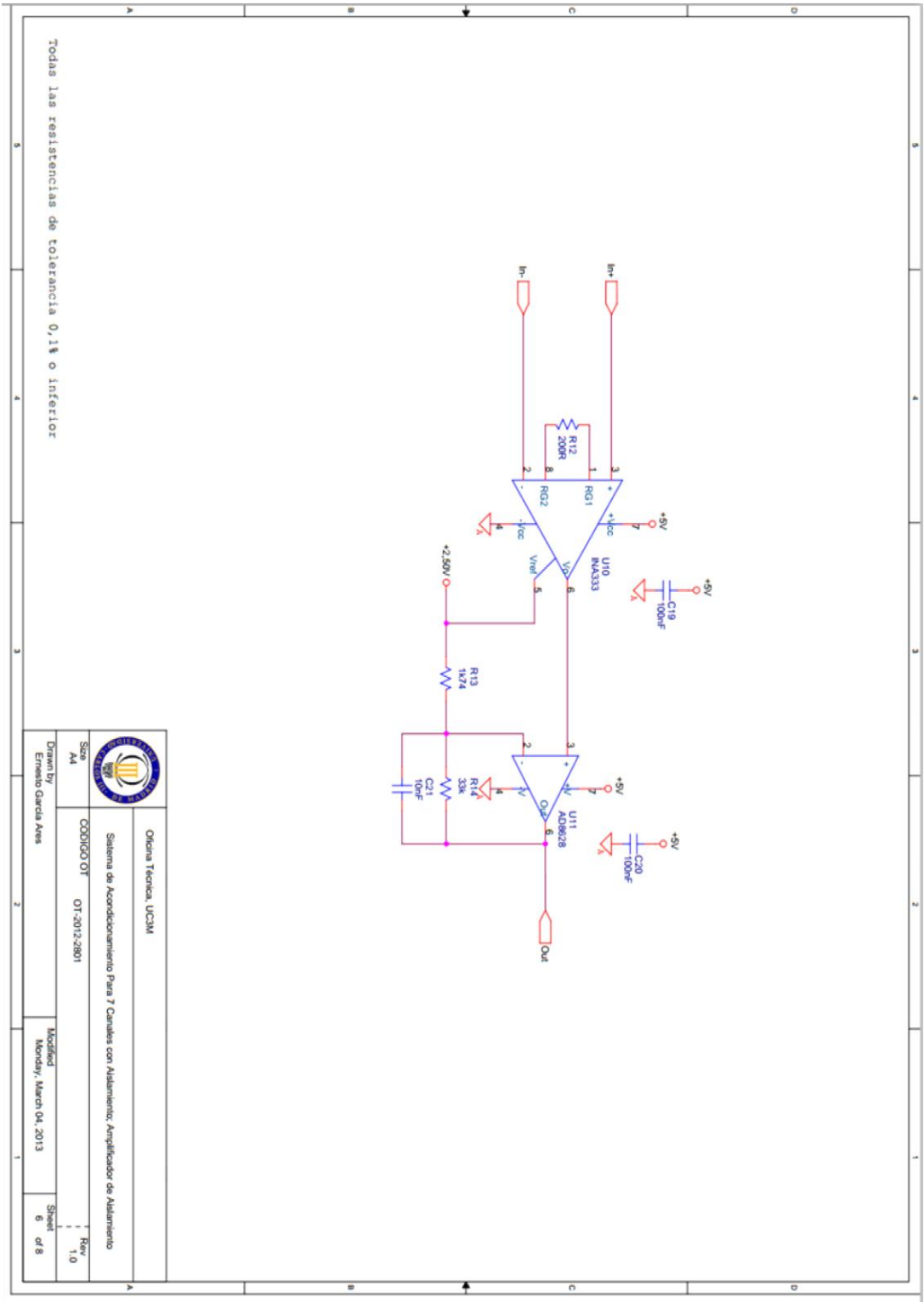


		Oficina Técnica, UCM	
Sistema de Acondicionamiento para célula de carga de 6 canales; Alimentación y Referencias			
Size	A4	CODIGO OT	OT-2010-3802
Drawn by	Ernesto García Ares	Modified	Friday, February 08, 2013
Sheet	2	Rev	1.0
	of 8		

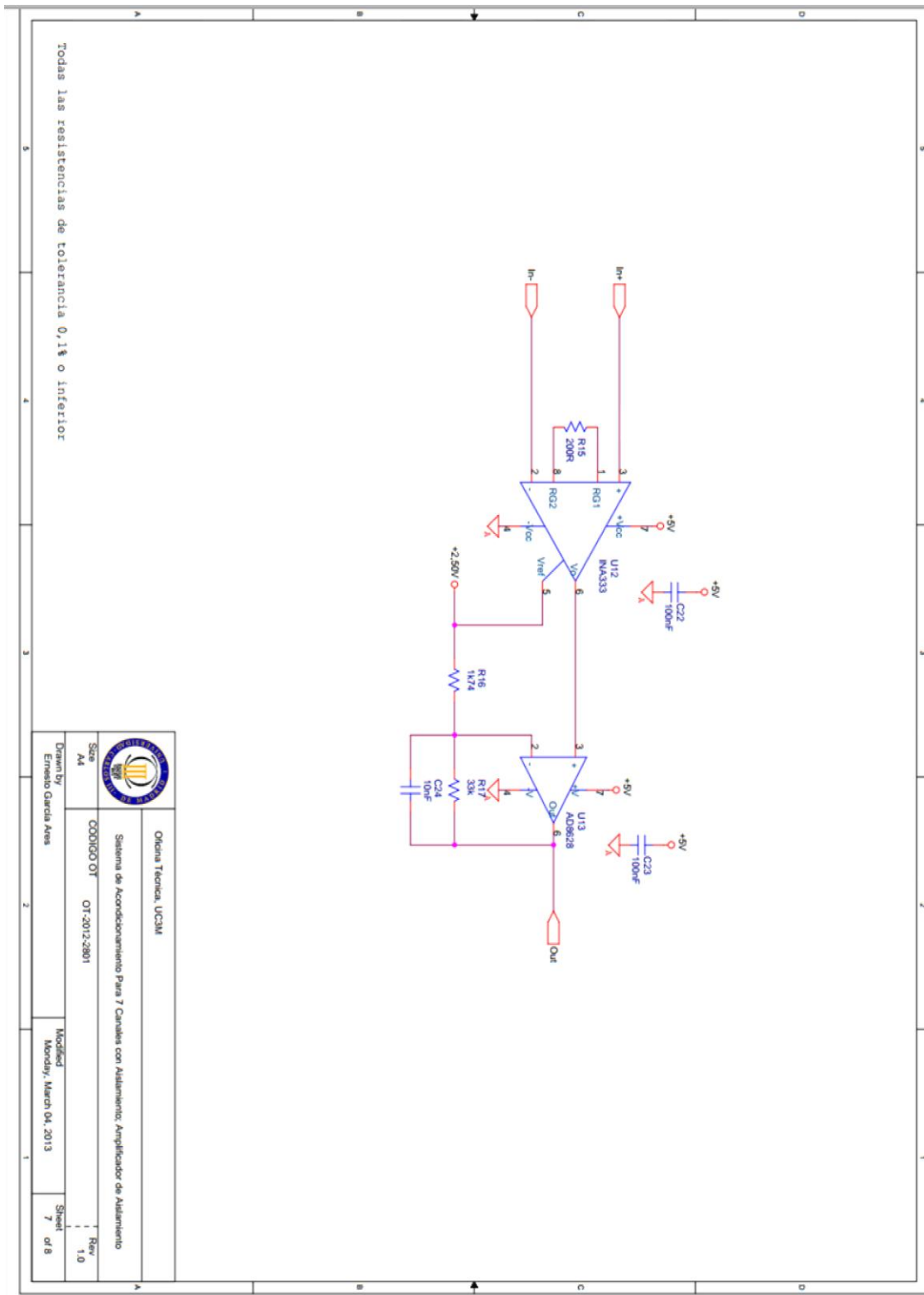


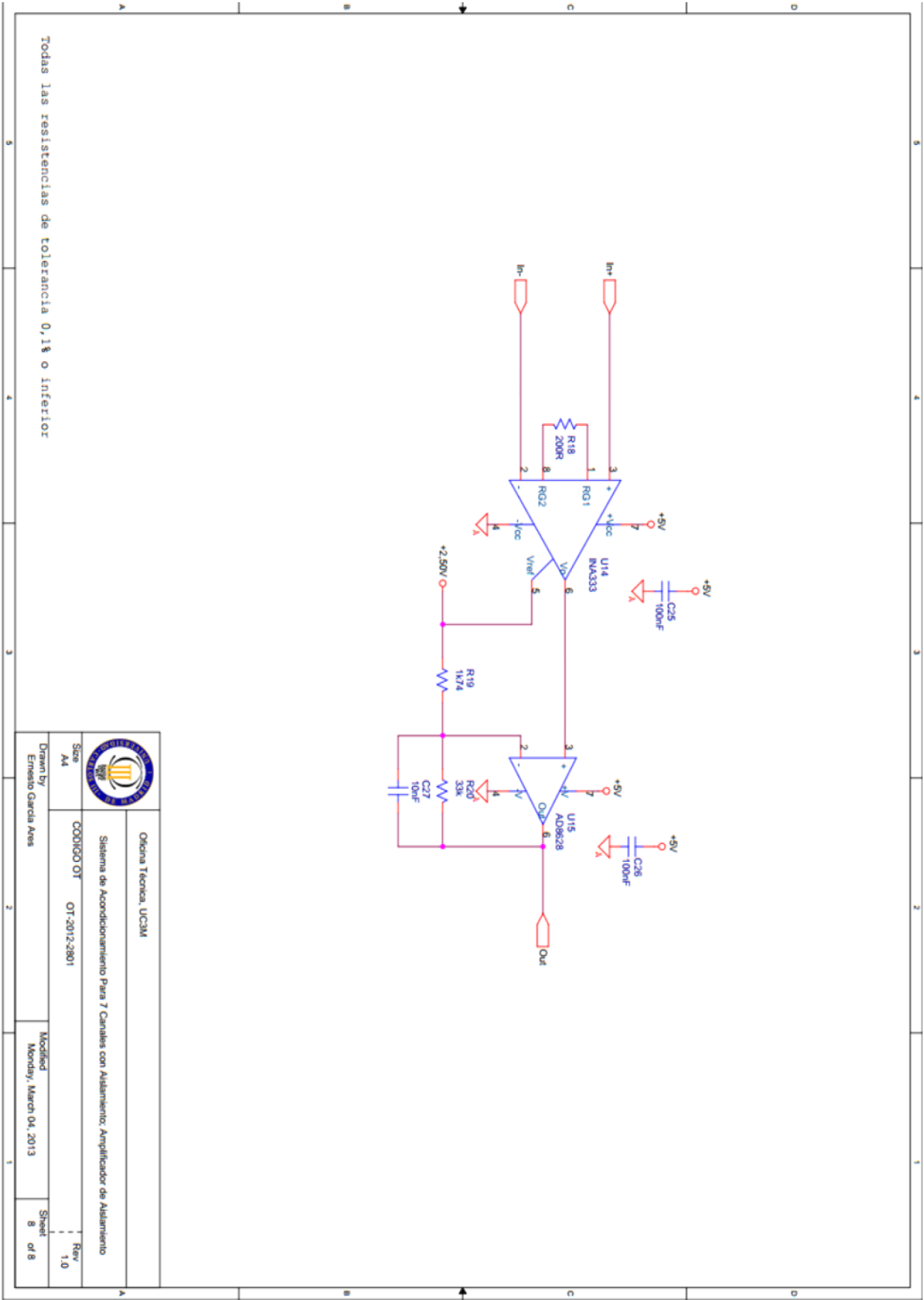






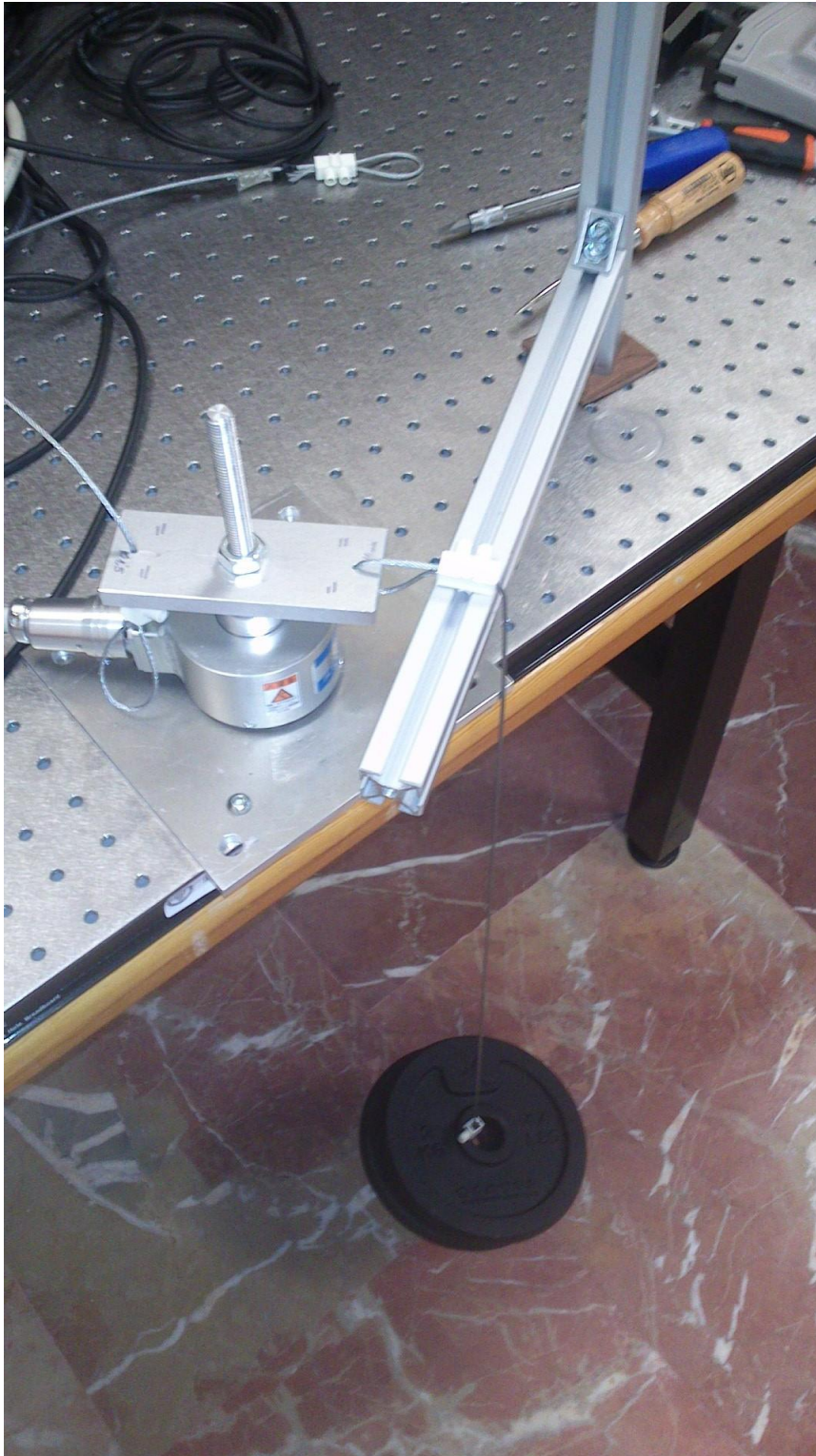






## 9.2. Imágenes del montaje y Medidas

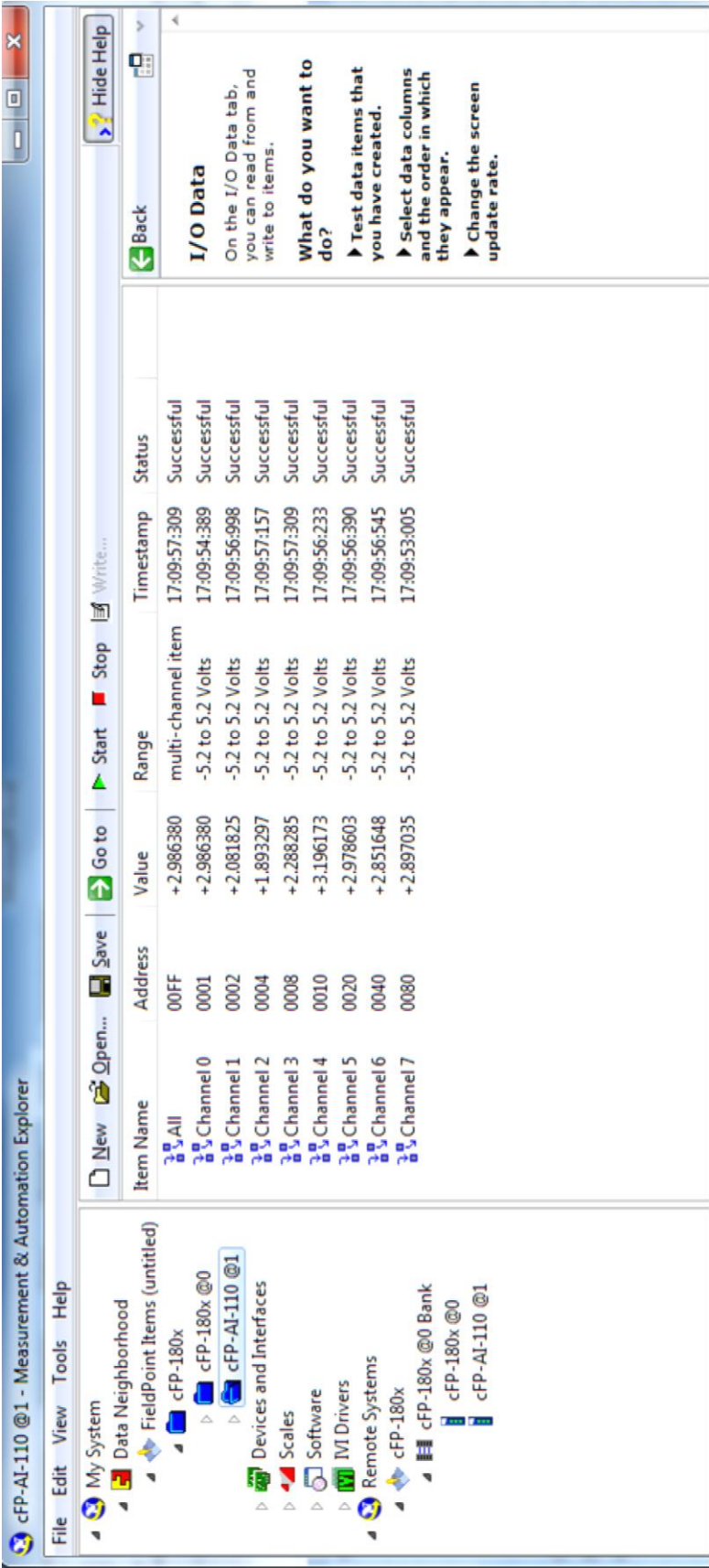
### 9.2.1. Fotografías del montaje:

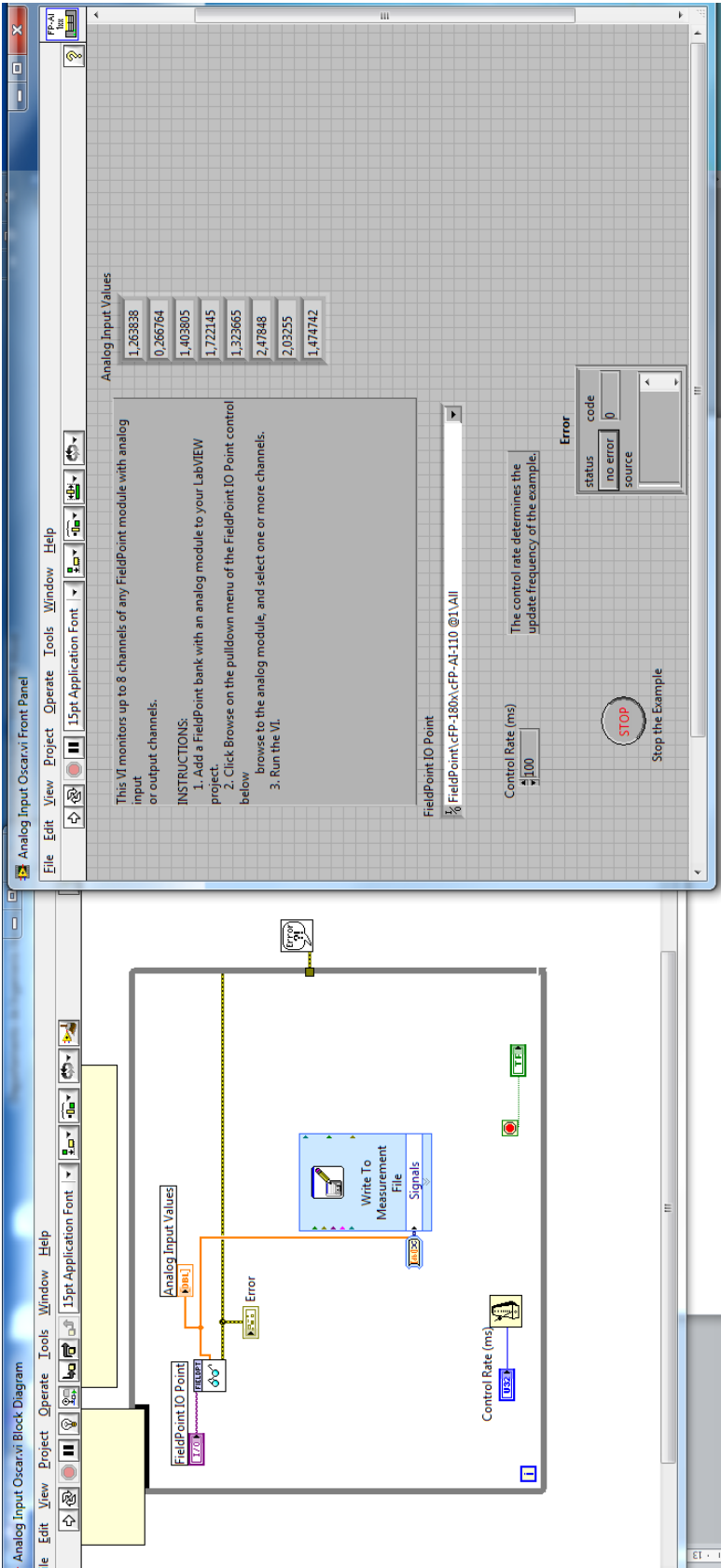






9.2.2. Imagen de LabView:





### 9.2.3. Medidas:

	MED Fx	MED Fy	MED Fz	MED Mx	MED My	MED Mz
1.	2.213716	2.275745	1.446955	1.494975	0.665423	2.462054;
2.	2.434748	2.274397	1.446372	1.495362	0.785542	2.460433;
3.	2.655742	2.272945	1.445661	1.495622	0.905715	2.458992;
4.	2.876745	2.271512	1.444922	1.495935	1.025823	2.457359;
5.	2.212789	2.275738	1.446958	1.494974	0.655995	2.462011;
6.	2.432745	2.274349	1.446333	1.495292	0.766525	2.460487;
7.	2.652712	2.272975	1.445623	1.495511	0.877175	2.458825;
8.	2.872756	2.271542	1.445052	1.495868	0.987662	2.457311;
9.	2.213889	2.275830	1.446971	1.495092	0.665551	2.488685;
10.	2.434841	2.274412	1.446285	1.495555	0.785732	2.513691;
11.	2.655923	2.273189	1.445559	1.495941	0.905975	2.538633;
12.	2.876925	2.271772	1.444722	1.496433	1.026188	2.563672;
13.	1.771702	2.278562	1.448330	1.494259	0.425195	2.465155;
14.	1.550789	2.279902	1.449012	1.493982	0.305020	2.466761;
15.	1.329753	2.281379	1.449655	1.493615	0.184925	2.468325;
16.	1.108745	2.282683	1.450374	1.493263	0.064764	2.469833;
17.	1.771778	2.278410	1.448354	1.494125	0.425102	2.438585;
18.	1.550695	2.279825	1.449031	1.493748	0.304868	2.413597;
19.	1.329600	2.281107	1.449825	1.493275	0.184684	2.388535;
20.	1.108553	2.282533	1.450582	1.492802	0.064462	2.363562;
21.	2.212845	2.275748	1.446956	1.495062	0.656030	2.488671;
22.	2.432883	2.274445	1.446271	1.495458	0.766625	2.513662;
23.	2.652920	2.273092	1.445555	1.495871	0.877375	2.538645;
24.	2.872918	2.271712	1.444831	1.496210	0.988061	2.563675;
25.	1.772798	2.278562	1.448320	1.494336	0.434732	2.465129;
26.	1.552772	2.279994	1.448912	1.494055	0.324145	2.466721;
27.	1.332730	2.281320	1.449672	1.493789	0.213575	2.468356;
28.	1.112755	2.282734	1.450368	1.493452	0.102965	2.469955;
29.	1.772891	2.278562	1.448255	1.494407	0.434845	2.491752;
30.	1.552850	2.280004	1.448831	1.494220	0.324321	2.519989;
31.	1.332935	2.281479	1.449525	1.494033	0.213832	2.548007;
32.	1.113095	2.282982	1.450192	1.493825	0.103258	2.576256;
33.	1.993012	2.135466	1.447778	1.386289	0.545597	2.464772;
34.	1.993335	1.993742	1.447858	1.277751	0.545751	2.465905;
35.	1.993695	1.852040	1.447992	1.169363	0.545952	2.467199;
36.	1.993904	1.710498	1.448185	1.060974	0.546145	2.468357;
37.	1.993035	2.136545	1.447792	1.376956	0.545566	2.464725;
38.	1.993398	1.995895	1.447850	1.259130	0.545871	2.465991;
39.	1.993652	1.855223	1.447948	1.141428	0.546056	2.467178;
40.	1.993946	1.714694	1.448075	1.023793	0.546358	2.468211;
41.	1.993123	2.135578	1.447752	1.386391	0.545691	2.491325;
42.	1.993425	1.993855	1.447849	1.277952	0.545933	2.519133;
43.	1.993789	1.852298	1.447873	1.169641	0.546125	2.546856;
44.	1.994145	1.710584	1.447942	1.061385	0.546444	2.574655;
45.	1.993112	2.136590	1.447746	1.377063	0.545662	2.491371;
46.	1.993401	1.995905	1.447792	1.259321	0.545920	2.519166;
47.	1.993736	1.855399	1.447761	1.141733	0.546335	2.546855;
48.	1.994177	1.714742	1.447868	1.024138	0.546675	2.574643;
49.	1.992446	2.418868	1.447512	1.603072	0.545158	2.462491;
50.	1.992103	2.560572	1.447452	1.711472	0.544971	2.461227;
51.	1.991991	2.702263	1.447381	1.819979	0.544763	2.460075;
52.	1.991667	2.843851	1.447197	1.928341	0.544520	2.458905;
53.	1.992422	2.417797	1.447572	1.612321	0.545062	2.462411;
54.	1.992104	2.558471	1.447456	1.730032	0.544852	2.461255;
55.	1.991876	2.699020	1.447381	1.847855	0.544574	2.460133;
56.	1.991628	2.839615	1.447379	1.965589	0.544385	2.458952;
57.	1.992575	2.418832	1.447403	1.603145	0.545229	2.489088;
58.	1.992243	2.560627	1.447355	1.711679	0.545031	2.514471;
59.	1.992012	2.702399	1.447112	1.820252	0.544975	2.539825;
60.	1.991899	2.844081	1.447092	1.928714	0.544825	2.565245;
61.	1.992556	2.417852	1.447578	1.612463	0.545100	2.489066;
62.	1.992248	2.558554	1.447331	1.730297	0.545012	2.514458;
63.	1.992007	2.699132	1.447220	1.848152	0.544899	2.539892;
64.	1.991803	2.839812	1.447191	1.965931	0.544678	2.565271;
65.	1.992450	2.418722	1.447552	1.602902	0.545043	2.435863;
66.	1.992093	2.560499	1.447595	1.711279	0.544742	2.408185;

67.	1.991785	2.702073	1.447448	1.819575	0.544462	2.380305;
68.	1.991417	2.843702	1.447300	1.927821	0.544181	2.352531;
69.	1.992463	2.417756	1.447692	1.612265	0.544958	2.435855;
70.	1.992045	2.558342	1.447581	1.729872	0.544615	2.408172;
71.	1.991792	2.698931	1.447544	1.847430	0.544375	2.380351;
72.	1.991428	2.839505	1.447456	1.965112	0.543926	2.352633;
73.	1.992841	2.277375	1.726887	1.494897	0.544745	2.464720;
74.	1.992956	2.277494	2.005905	1.495151	0.544292	2.465994;
75.	1.992696	2.276922	1.168592	1.494332	0.545867	2.462475;
76.	1.992592	2.276815	0.889358	1.494011	0.546431	2.461208;
77.	1.990737	2.277048	1.308141	1.494405	0.526552	2.463014;
78.	1.988675	2.276997	1.168588	1.494297	0.507715	2.462411;
79.	1.986659	2.276842	1.028957	1.494051	0.488992	2.461855;
80.	1.984575	2.276744	0.889431	1.493720	0.470185	2.461171;
81.	1.991700	2.277010	1.308012	1.494447	0.536012	2.463082;
82.	1.990697	2.276928	1.168585	1.494295	0.526752	2.462458;
83.	1.989648	2.276891	1.028997	1.494123	0.517578	2.461878;
84.	1.988526	2.276712	0.889325	1.493988	0.508298	2.461225;



### 9.3 Código para obtener la matriz de calibración

```
clear all
```

```
clc
```

```
A=[
```

```
    2.213716  2.275745  1.446955  1.494975  0.665423  2.462054;  
    2.434748  2.274397  1.446372  1.495362  0.785542  2.460433;  
    2.655742  2.272945  1.445661  1.495622  0.905715  2.458992;  
    2.876745  2.271512  1.444922  1.495935  1.025823  2.457359;  
    2.212789  2.275738  1.446958  1.494974  0.655995  2.462011;  
    2.432745  2.274349  1.446333  1.495292  0.766525  2.460487;  
    2.652712  2.272975  1.445623  1.495511  0.877175  2.458825;  
    2.872756  2.271542  1.445052  1.495868  0.987662  2.457311;  
    2.213889  2.275830  1.446971  1.495092  0.665551  2.488685;  
    2.434841  2.274412  1.446285  1.495555  0.785732  2.513691;  
    2.655923  2.273189  1.445559  1.495941  0.905975  2.538633;  
    2.876925  2.271772  1.444722  1.496433  1.026188  2.563672;  
    1.771702  2.278562  1.448330  1.494259  0.425195  2.465155;  
    1.550789  2.279902  1.449012  1.493982  0.305020  2.466761;  
    1.329753  2.281379  1.449655  1.493615  0.184925  2.468325;  
    1.108745  2.282683  1.450374  1.493263  0.064764  2.469833;  
    1.771778  2.278410  1.448354  1.494125  0.425102  2.438585;  
    1.550695  2.279825  1.449031  1.493748  0.304868  2.413597;  
    1.329600  2.281107  1.449825  1.493275  0.184684  2.388535;  
    1.108553  2.282533  1.450582  1.492802  0.064462  2.363562;  
    2.212845  2.275748  1.446956  1.495062  0.656030  2.488671;  
    2.432883  2.274445  1.446271  1.495458  0.766625  2.513662;
```

2.652920	2.273092	1.445555	1.495871	0.877375	2.538645;
2.872918	2.271712	1.444831	1.496210	0.988061	2.563675;
1.772798	2.278562	1.448320	1.494336	0.434732	2.465129;
1.552772	2.279994	1.448912	1.494055	0.324145	2.466721;
1.332730	2.281320	1.449672	1.493789	0.213575	2.468356;
1.112755	2.282734	1.450368	1.493452	0.102965	2.469955;
1.772891	2.278562	1.448255	1.494407	0.434845	2.491752;
1.552850	2.280004	1.448831	1.494220	0.324321	2.519989;
1.332935	2.281479	1.449525	1.494033	0.213832	2.548007;
1.113095	2.282982	1.450192	1.493825	0.103258	2.576256;
1.993012	2.135466	1.447778	1.386289	0.545597	2.464772;
1.993335	1.993742	1.447858	1.277751	0.545751	2.465905;
1.993695	1.852040	1.447992	1.169363	0.545952	2.467199;
1.993904	1.710498	1.448185	1.060974	0.546145	2.468357;
1.993035	2.136545	1.447792	1.376956	0.545566	2.464725;
1.993398	1.995895	1.447850	1.259130	0.545871	2.465991;
1.993652	1.855223	1.447948	1.141428	0.546056	2.467178;
1.993946	1.714694	1.448075	1.023793	0.546358	2.468211;
1.993123	2.135578	1.447752	1.386391	0.545691	2.491325;
1.993425	1.993855	1.447849	1.277952	0.545933	2.519133;
1.993789	1.852298	1.447873	1.169641	0.546125	2.546856;
1.994145	1.710584	1.447942	1.061385	0.546444	2.574655;
1.993112	2.136590	1.447746	1.377063	0.545662	2.491371;
1.993401	1.995905	1.447792	1.259321	0.545920	2.519166;
1.993736	1.855399	1.447761	1.141733	0.546335	2.546855;
1.994177	1.714742	1.447868	1.024138	0.546675	2.574643;
1.992446	2.418868	1.447512	1.603072	0.545158	2.462491;

1.992103	2.560572	1.447452	1.711472	0.544971	2.461227;
1.991991	2.702263	1.447381	1.819979	0.544763	2.460075;
1.991667	2.843851	1.447197	1.928341	0.544520	2.458905;
1.992422	2.417797	1.447572	1.612321	0.545062	2.462411;
1.992104	2.558471	1.447456	1.730032	0.544852	2.461255;
1.991876	2.699020	1.447381	1.847855	0.544574	2.460133;
1.991628	2.839615	1.447379	1.965589	0.544385	2.458952;
1.992575	2.418832	1.447403	1.603145	0.545229	2.489088;
1.992243	2.560627	1.447355	1.711679	0.545031	2.514471;
1.992012	2.702399	1.447112	1.820252	0.544975	2.539825;
1.991899	2.844081	1.447092	1.928714	0.544825	2.565245;
1.992556	2.417852	1.447578	1.612463	0.545100	2.489066;
1.992248	2.558554	1.447331	1.730297	0.545012	2.514458;
1.992007	2.699132	1.447220	1.848152	0.544899	2.539892;
1.991803	2.839812	1.447191	1.965931	0.544678	2.565271;
1.992450	2.418722	1.447552	1.602902	0.545043	2.435863;
1.992093	2.560499	1.447595	1.711279	0.544742	2.408185;
1.991785	2.702073	1.447448	1.819575	0.544462	2.380305;
1.991417	2.843702	1.447300	1.927821	0.544181	2.352531;
1.992463	2.417756	1.447692	1.612265	0.544958	2.435855;
1.992045	2.558342	1.447581	1.729872	0.544615	2.408172;
1.991792	2.698931	1.447544	1.847430	0.544375	2.380351;
1.991428	2.839505	1.447456	1.965112	0.543926	2.352633;
1.992841	2.277375	1.726887	1.494897	0.544745	2.464720;
1.992956	2.277494	2.005905	1.495151	0.544292	2.465994;
1.992696	2.276922	1.168592	1.494332	0.545867	2.462475;
1.992592	2.276815	0.889358	1.494011	0.546431	2.461208;

```

1.990737  2.277048  1.308141  1.494405  0.526552  2.463014;
1.988675  2.276997  1.168588  1.494297  0.507715  2.462411;
1.986659  2.276842  1.028957  1.494051  0.488992  2.461855;
1.984575  2.276744  0.889431  1.493720  0.470185  2.461171;
1.991700  2.277010  1.308012  1.494447  0.536012  2.463082;
1.990697  2.276928  1.168585  1.494295  0.526752  2.462458;
1.989648  2.276891  1.028997  1.494123  0.517578  2.461878;
1.988526  2.276712  0.889325  1.493988  0.508298  2.461225;]*10^-5;

```

b=[

```

1 0 0 0 (0.06*1) 0;
2 0 0 0 (0.06*2) 0;
3 0 0 0 (0.06*3) 0;
4 0 0 0 (0.06*4) 0;
1 0 0 0 (0.03*1) 0;
2 0 0 0 (0.03*2) 0;
3 0 0 0 (0.03*3) 0;
4 0 0 0 (0.03*4) 0;
1 0 0 0 (0.06*1) (0.05*1);
2 0 0 0 (0.06*2) (0.05*2);
3 0 0 0 (0.06*3) (0.05*3);
4 0 0 0 (0.06*4) (0.05*4);
-1 0 0 0 (0.06)*-1 0;
-2 0 0 0 (0.06)*-2 0;
-3 0 0 0 (0.06)*-3 0;
-4 0 0 0 (0.06)*-4 0;
-1 0 0 0 (0.06)*-1 (0.05)*1;
-2 0 0 0 (0.06)*-2 (0.05)*2;

```

-3 0 0 0 (0.06)\*-3 (0.05)\*3;

-4 0 0 0 (0.06)\*-4 (0.05)\*4;

%%%%%%%%%

1 0 0 0 (0.03\*1) (0.05\*1);

2 0 0 0 (0.03\*2) (0.05\*2);

3 0 0 0 (0.03\*3) (0.05\*3);

4 0 0 0 (0.03\*4) (0.05\*4);

-1 0 0 0 (0.03)\*-1 0;

-2 0 0 0 (0.03)\*-2 0;

-3 0 0 0 (0.03)\*-3 0;

-4 0 0 0 (0.03)\*-4 0;

-1 0 0 0 (0.03)\*-1 (0.05)\*1;

-2 0 0 0 (0.03)\*-2 (0.05)\*2;

-3 0 0 0 (0.03)\*-3 (0.05)\*3;

-4 0 0 0 (0.03)\*-4 (0.05)\*4;

%%%%%%%%%

%%Medidas con Fy 20

0 -1 0 (0.06\*1) 0 0;

0 -2 0 (0.06\*2) 0 0;

0 -3 0 (0.06\*3) 0 0;

0 -4 0 (0.06\*4) 0 0;

0 -1 0 (0.03\*1) 0 0;

0 -2 0 (0.03\*2) 0 0;

0 -3 0 (0.03\*3) 0 0;

0 -4 0 (0.03\*4) 0 0;

0 -1 0 (0.06\*1) 0 (0.05\*1);

0 -2 0 (0.06\*2) 0 (0.05\*2);

0 -3 0 (0.06\*3) 0 (0.05\*3);

0 -4 0 (0.06\*4) 0 (0.05\*4);

0 -1 0 (0.03\*1) 0 (0.05\*1);

0 -2 0 (0.03\*2) 0 (0.05\*2);

0 -3 0 (0.03\*3) 0 (0.05\*3);

0 -4 0 (0.03\*4) 0 (0.05\*4);

0 1 0 (0.06)\*-1 0 0;

0 2 0 (0.06)\*-2 0 0;

0 3 0 (0.06)\*-3 0 0;

0 4 0 (0.06)\*-4 0 0;

0 1 0 (0.03)\*-1 0 0;

0 2 0 (0.03)\*-2 0 0;

0 3 0 (0.03)\*-3 0 0;

0 4 0 (0.03)\*-4 0 0;

0 1 0 (0.06)\*-1 0 (0.05)\*1;

0 2 0 (0.06)\*-2 0 (0.05)\*2;

0 3 0 (0.06)\*-3 0 (0.05)\*3;

0 4 0 (0.06)\*-4 0 (0.05)\*4;

0 1 0 (0.03)\*-1 0 (0.05)\*1;

0 2 0 (0.03)\*-2 0 (0.05)\*2;

0 3 0 (0.03)\*-3 0 (0.05)\*3;

0 4 0 (0.03)\*-4 0 (0.05)\*4;

0 1 0 (0.06)\*-1 0 (0.05)\*-1;

0 2 0 (0.06)\*-2 0 (0.05)\*-2;

0 3 0 (0.06)\*-3 0 (0.05)\*-3;

0 4 0 (0.06)\*-4 0 (0.05)\*-4;

0 1 0 (0.03)\*-1 0 (0.05)\*-1;

```
0 2 0 (0.03)*-2 0 (0.05)*-2;
```

```
0 3 0 (0.03)*-3 0 (0.05)*-3;
```

```
0 4 0 (0.03)*-4 0 (0.05)*-4;
```

```
%%Medidas con Fz 6
```

```
0 0 2 0 0 0;
```

```
0 0 4 0 0 0;
```

```
0 0 -2 0 0 0;
```

```
0 0 -4 0 0 0;
```

```
0 0 -1 0 -1*0.06 0;
```

```
0 0 -2 0 -2*0.06 0;
```

```
0 0 -3 0 -3*0.06 0;
```

```
0 0 -4 0 -4*0.06 0;
```

```
0 0 -1 0 -1*0.03 0;
```

```
0 0 -2 0 -2*0.03 0;
```

```
0 0 -3 0 -3*0.03 0;
```

```
0 0 -4 0 -4*0.03 0;];
```

```
q=[1.992718 2.277098 1.447605 1.494578 0.540272 2.463563]*10^-5;
```

```
[d,e]=size(A);
```

```
O=ones(d,1);
```

```
T=(O*q);
```

```
A=A-T;
```

```
b=b*9.81;
```

```
A1=A';
```

```
x=((A1*A)^-1)*A1*b
```

```
%Matriz dada por el fabricante multiplicada por 2
```

$y = [2274.29 \ 22.34 \ 8.58 \ -8.25 \ -722.96 \ 7.15;$

$4.13 \ 3078.84 \ 9.27 \ -1261.32 \ -4.11 \ 7.08;$

$-1.19 \ -2.22 \ 3395.34 \ -0.54 \ 3.34 \ -3.77;$

$0.14 \ 347.56 \ -8.44 \ 1385.92 \ 6.35 \ 0.4;$

$-238.84 \ -6.62 \ 3.5 \ -3.33 \ 1566.56 \ -1.48$

$-3.64 \ -6.67 \ 5.33 \ -3.43 \ -3.79 \ 891.37] \cdot 10^{-6}$

$x = x / (2 \cdot 10^9)$



## 9.4 Matriz de calibración dada por el fabricante

Inspection data sheet

Model	LAT-10KA-1	Inspected date	2006.5.21	S/N.	630900001
Temperature	23 °C	Humidity	50 %RH	FDP-106A	S/N.

	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
Capacity	100	100	200	10	10	10
	N	N	N	N·m	N·m	N·m

		FX	FY	FZ	MX	MY	MZ	unit.
1. Non-linearity	Positive Direction	-0.04	-0.08	0.01	-0.16	-0.13	-0.09	%RO
	Negative Direction	0.07	-0.06	0.05	0.11	0.14	-0.10	
2. Hysteresis	Positive Direction	-0.12	-0.02	-0.03	0.17	0.06	-0.14	
	Negative Direction	-0.14	-0.09	-0.02	-0.19	0.07	-0.11	
3. Cross talk		0.22	-0.18	0.23	0.17	0.29	0.10	
4. Max. difference value		0.90	0.95	0.53	0.54	0.52	0.34	

Calibration line		FX	FY	FZ	MX	MY	MZ	unit.
FX	2274.29	22.34	8.58	-8.25	-722.96	7.15	-6 × 10	
FY	4.13	3078.84	9.27	-1261.32	-4.11	7.08		
FZ	-1.19	-2.22	3395.34	-0.54	3.34	-3.77		
MX	0.14	347.56	-8.44	1385.92	8.35	0.40		
MY	-238.84	-6.62	3.50	-3.33	1566.56	-1.48		
MZ	-3.64	-6.67	5.33	-3.43	-3.79	891.37		

Above specification is measured value by our calibration machine with Kyowa standard condition.

Specification is max. value after compensation on the calibration line.

Caluburation line is writed in included FDD.

Inspector



Manager



## 9.5 Cómo usar

En este proyecto para poder realizar las medidas se han empleado diferentes aparatos de medida así como el programa LabView.

El objetivo de esta guía es mostrar de manera sencilla como se podrían realizar medidas en el futuro. Para ello se separará el proceso en dos partes, el montaje físico y el referente al software.

### Montaje físico:

Para montar la célula de carga debe atornillarse a una base, para después poder ser atornillada a una mesa óptica. Es importante tener en cuenta el no superar el par de apriete máximo permitido por la célula.

La célula debe enchufarse al transformador, que va enchufado directamente al ordenador mediante un cable usb-mini usb.

Las salidas de este transformador, que ya tiene el amplificador integrado deben enchufarse al FieldPoint. El FieldPoint dispone de 8 entradas de las cuales solo usaremos 6. El FieldPoint va enchufado a la toma de corriente mediante un transformador. Este transformador se enchufa con una de las salidas a C y otra a V teniendo en cuenta que la marca blanca en el cable corresponde a la marca blanca del FieldPoint.

### Configuración de software:

Una vez realizado todo el montaje físico, debemos instalar una versión de LabView, así como los correspondientes drivers del FieldPoint.

Realmente si queremos una medida rápida y no queremos procesar los datos medidos por el FieldPoint, solo leerlos, se puede usar la aplicación measurement&automationexplorer instalada por defecto al instalar LabView.

Una vez en ella, lo primero será detectar el FieldPoint para ello en remotesystems automáticamente aparecerá el FieldPoint el cual entrando en él y poniendo todo por defecto se auto configurará. (Una vez procese automáticamente pulsar el botón finddevices)

Una vez realizada la sincronización, podemos ver los datos que envía el FieldPoint en Data Neighborhood, donde veremos las 8 salidas del FieldPoint. Dando a start empezaran a medirse los valores, el tiempo de refresco es configurable. Se puede usar el ejemplo de FieldPoint de LabView si queremos procesar datos

Para saber a qué medida corresponde cada una de nuestras 6 salidas, la manera más simple es realizar una fuerza o momento de manera manual y ver cómo va variando.